

**Estudio de la posibilidad de implementar un tranvía
eléctrico para el transporte de pasajeros en Uruguay**

por

**Martín Avas
Gerardo Barreneche
Gabriel Di Lavello**

Tutor: Dr. Ing. Mario Vignolo

Proyecto de Fin de Carrera

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en
cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

Ingeniero Electricista

Universidad de la República

Noviembre 2012

Agradecimientos

Queremos agradecerles a todas las personas que colaboraron, en forma directa o indirecta, en la realización del Proyecto. A Fernando Sunyer, Jairo Sandoval, Gonzalo Arocena y Henry Herrera, por proveernos de información técnica muy valiosa. Gracias al Ing. Diego Betancur, al Arq. Juan Vespa, a Justo Onandi, Diego Forteza, a la Ing. Verónica Orellano, al Ing. Gino Cirimele, a la Ing. Silvia Valle, al Ing. Martín Bremermann y a todas las personas que respondieron la encuesta, por colaborar con datos e información que ayudaron a realizar en forma exitosa el Proyecto. Gracias a todos los proveedores que nos aportaron información valiosa.

Muchas gracias a los profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, el Ing. Nicolás Yedrzejewski, el Ing. Fernando Chiaramello y el Ing. Tomás Di Lavello, por evacuar nuestras dudas y consultas.

Un agradecimiento especial a nuestro tutor, el Dr. Ing. Mario Vignolo, por guiarnos durante todo este tiempo.

Por último, agradecer a nuestras familias y seres queridos, que sin su apoyo y comprensión este Proyecto no podría haber salido adelante.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	ii
Tabla de Contenidos	iii
Tabla de Tablas	vii
Tabla de Gráficas	xiii
Tabla de Figuras.....	xv
Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Historia del Tranvía	3
Capítulo 3: Antecedentes Nacionales	6
3.1. Tranvía eléctrico	6
3.2. ¿Por qué desaparecieron?.....	11
3.3. Antecedentes de proyecto de subterráneo en Montevideo.....	12
3.4. Antecedentes del trolebús en Montevideo	14
Capítulo 4: Comparación con otros medios de transporte	21
4.1. Introducción	21
4.2. Capacidad de transporte.....	21
4.3. Impacto ambiental.....	25
4.4. Consumo de energía.....	32
4.5. Aprovechamiento del espacio urbano	41
4.6. Seguridad	44
Capítulo 5: Tecnologías de Tracción.....	47
5.1. Aterramiento de los sistemas ferroviarios AC y DC	50
5.2. Circuito de retorno	51
5.3. Sistemas de tracción de corriente continua	54
5.4. Sistemas de tracción monofásicos de 16,7Hz	55

5.5. Sistemas de tracción monofásicos de 50Hz	57
5.6. Elección de la tecnología de tracción.....	59
5.7. Funcionamiento del tranvía.....	60
Capítulo 6: Determinación de la trayectoria del tranvía	64
Capítulo 7: Frecuencia de Paso y Potencia de las Subestaciones	75
Capítulo 8: Elección de la tensión a la cual se insertan las subestaciones de tracción	81
8.1. Introducción.....	81
8.2. Inserción en 6kV.....	81
Capítulo 9: Flujo de Carga.....	90
9.1. Software utilizado.....	90
9.2. Zona de estudio y modelado de la red	90
9.2.1. Introducción	90
9.2.2. Modelado de las líneas	93
9.2.3. Modelado de las cargas	95
9.2.4. Modelado de generadores	97
9.3. Flujos de carga.....	98
9.3.1. Estado actual de la zona de estudio.....	98
9.3.2. Elección de los puntos de inserción de las subestaciones de tracción	99
9.3.2.1. Inserción de las subestaciones 1 y 2	101
9.3.2.2. Inserción de las subestaciones 3 y 4	104
9.3.2.3. Inserción de la subestación 5	107
9.3.3. Análisis de contingencias - configuración N-1	110
9.3.3.1. Falla alimentación N de PCyM-01	111
9.3.3.2. Falla alimentación N de PCyM-02	114

9.3.3.3. Falla alimentación N de PCyM-03	118
Capítulo 10: Efecto en las Curvas de Carga y Demanda	121
10.1. Efecto en las Curvas de Carga	121
10.1.1. Efecto en cada subestación	121
10.1.2. Efecto en la zona de conexión.....	128
10.2. Efecto en la Curva de Demanda	130
Capítulo 11: Puesta a Tierra	133
11.1. Diseño de la Malla de Puesta a Tierra	134
11.2. Determinación del área de aterramiento y modelado del suelo.....	134
11.3. Dimensionado del conductor de la malla	136
11.4. Determinación de las tensiones admisibles	139
11.5. Diferencia de potencial admitida.....	140
11.6. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra	142
11.7. Determinación de la resistencia de puesta a tierra.....	143
11.8. Circulación de corriente por la malla	144
11.9. Cálculo del GPR.....	145
11.10. Cálculo de la tensión de Mesh.....	146
11.11. Cálculo de la tensión de Step.....	149
Capítulo 12: Estudio Económico	152
12.1. Inversión inicial	152
12.1.1. Costo de infraestructura eléctrica.....	152
12.1.2. Costo de infraestructura ferroviaria	154
12.1.3. Costo de infraestructura civil	154
12.1.4. Costo de diseño e ingeniería	155
12.1.5. Resumen de la Inversión Inicial.....	155

12.2. Costos de Funcionamiento	155
12.2.1. Costo relacionado con la ruta.....	156
12.2.2. Costo relacionado con el tiempo.....	157
12.2.3. Costo relacionado con la distancia.....	158
12.2.4. Resumen de los Costos de Funcionamiento.....	160
12.3. Estudio de Ingresos.....	161
12.4. Evaluación y resultados.....	162
12.4.1. Criterios de evaluación.....	162
12.4.2. Criterio de decisión.....	163
12.4.3. Resultados obtenidos.....	164
Conclusiones	169
Anexo A: Funcionamiento del Rectificador de 12 Pulsos.....	172
Anexo B: Iluminación de las Subestaciones de Tracción	190
Anexo C: Memoria Descriptiva	223
Anexo D: Memoria de Cálculo.....	233
Bibliografía	245
Referencias.....	249

Tabla de Tablas

Tabla 4.1:	Costos de implementación - BRT y LRT	22
Tabla 4.2:	Niveles sonoros y respuesta humana	31
Tabla 4.3:	Empadronamientos en Montevideo	31
Tabla 4.4:	Consumo total de energía en el sector transporte en unidades de medición.....	34
Tabla 4.5:	Consumo total de energía en el sector transporte en <i>tep</i>	34
Tabla 4.6:	Energía consumida por el tranvía el día 8 de Marzo de 2012.....	36
Tabla 4.7:	Energía consumida por el tranvía en una semana	37
Tabla 4.8:	Espacio urbano requerido para trasladar 15.000 personas.....	41
Tabla 4.9:	Evolución de accidentes de tránsito totales por año y gravedad en Montevideo	45
Tabla 4.10:	Evolución de accidentes de tránsito en jurisdicción de la Intendencia de Montevideo por año y gravedad.....	45
Tabla 4.11:	Evolución de accidentes de tránsito en jurisdicción Nacional dentro de Montevideo por año y gravedad.....	45
Tabla 5.1:	Tensiones nominales y límites operacionales para sistemas ferroviarios eléctricos según Norma En 50 163.....	48
Tabla 6.1:	Medio de transporte en el que prefiere viajar	68
Tabla 6.2:	Cantidad de veces que viajó por Av. 18 de Julio en la última semana.....	68
Tabla 6.3:	Horario en que viaja usualmente por Av. 18 de Julio.....	69
Tabla 6.4:	¿Cómo cree que afectará a los locales comerciales la implementación del tranvía eléctrico?	69
Tabla 6.5:	¿Cómo cree que afectará a los vecinos la implementación del tranvía eléctrico?	70

Tabla 6.6:	¿Cree que el sistema de transporte actual satisface la demanda de pasajeros?.....	70
Tabla 6.7:	¿Cuáles cree que son las razones para no construir un tranvía?	71
Tabla 6.8:	¿Cuánto pagaría por un pasaje?	71
Tabla 6.9:	¿Cómo ve la creación de un sistema de parking en algún lugar del recorrido?	72
Tabla 6.10:	¿Cree usted que el tranvía mejorará el sistema de transporte urbano?.....	72
Tabla 6.11:	¿Con qué fin utiliza el transporte público?	73
Tabla 6.12:	¿Cuánto tiempo demora su viaje en autobús desde que se sube hasta que desciende del mismo?	73
Tabla 6.13:	¿Cuánto tiempo demora esperando que pase el autobús?.....	74
Tabla 7.1:	Cantidad de pasajeros por hora que utilizan el transporte público por la Av. 18 de Julio	75
Tabla 7.2:	Número de tranvías necesarios por hora y Frecuencia de Paso	77
Tabla 8.1:	Carga que deben soportar los cables según la carga probabilizada .	84
Tabla 8.2:	Carga máxima admisible por los cables según la sobrecarga admitida.....	84
Tabla 8.3:	Carga en los transformadores de las estaciones 30/6kV aledañas al trayecto del tranvía.....	85
Tabla 9.1:	Datos técnicos de las líneas conectadas a MF	93
Tabla 9.2:	Datos técnicos de las líneas conectadas a ME	94
Tabla 9.3:	Datos técnicos de las líneas conectadas a MJ	94
Tabla 9.4:	Potencias Activa y Reactiva asociadas a cada barra.....	96
Tabla 9.5:	Potencias Activa y Reactiva en cada barra de las estaciones de la zona de estudio.....	97
Tabla 9.6:	Estado actual de carga de las líneas de 30kV	98

Tabla 9.7:	Carga de los cables de MT antes y después de insertar las SSEE 1 y 2.....	103
Tabla 9.8:	Carga de los cables de MT antes y después de insertar las SSEE 3 y 4.....	107
Tabla 9.9:	Carga de los cables de MT antes y después de insertar la SSEE 5	110
Tabla 9.10:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=1$ - PCyM-01	112
Tabla 9.11:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,9$ - PCyM-01	112
Tabla 9.12:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,8$ - PCyM-01	112
Tabla 9.13:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,7$ - PCyM-01	113
Tabla 9.14:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,65$ - PCyM-01	113
Tabla 9.15:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=1$ - Respaldo en E02	113
Tabla 9.16:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=1$ - PCyM-02.....	114
Tabla 9.17:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,9$ - PCyM-02.....	115
Tabla 9.18:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,8$ - PCyM-02.....	115
Tabla 9.19:	Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,7$ - PCyM-02.....	116

Tabla 9.20: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,65$ - PCyM-02	116
Tabla 9.21: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=1$ - Respaldo en E32	117
Tabla 9.22: Carga de los cables de MT para varios factores de carga probabilizada - Respaldo en E32 y E04	117
Tabla 9.23: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=1$ - PCyM-03	118
Tabla 9.24: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,9$ - PCyM-03	119
Tabla 9.25: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada $f_p=0,8$ - PCyM-03	119
Tabla 9.26: Carga de los cables de MT para varios factores de carga probabilizada - Respaldo en E38	120
Tabla 10.1: Cantidad máxima de tranvías por subestación de tracción	121
Tabla 10.2: Cantidad de Tranvías y Carga por hora de SSEE de tracción.....	129
Tabla 10.3: Demanda total por hora de Uruguay	130
Tabla 10.4: Potencia total de las subestaciones de tracción.....	131
Tabla 11.1: Resistividades aparentes	135
Tabla 11.2: Máxima corriente de cortocircuito y mínima sección del conductor de la malla	139
Tabla 11.3: Tensiones de toque y de paso máximas admisibles	142
Tabla 11.4: Resistencia de Puesta a Tierra.....	144
Tabla 11.5: Corriente de circulación por la malla de puesta a tierra.....	145
Tabla 11.6: Valor del GPR para los tres diseños de malla de puesta a tierra....	145
Tabla 11.7: Valores de n y K_i para los tres diseños de malla de puesta a tierra	146

Tabla 11.8: Valores de L_M para los tres diseños de malla de puesta a tierra	147
Tabla 11.9: Valores de K_M para los tres diseños de malla de puesta a tierra....	148
Tabla 11.10: Valores de la tensión de Mesh según la subestación de tracción...	148
Tabla 11.11: Tensiones de Mesh y de toque máxima admisible según la subestación de tracción	148
Tabla 11.12: Valores de L_S para los tres diseños de malla de puesta a tierra	149
Tabla 11.13: Valores de K_S para los tres diseños de malla de puesta a tierra.....	150
Tabla 11.14: Valores de la tensión de Step según la subestación de tracción	150
Tabla 11.15: Tensiones de Step y de paso máxima admisible según la subestación de tracción.....	150
Tabla 12.1: Costos de infraestructura eléctrica	153
Tabla 12.2: Costos de infraestructura ferroviaria.....	154
Tabla 12.3: Costos de infraestructura civil	154
Tabla 12.4: Costo Total y costos por sección	155
Tabla 12.5: Costos unitarios según Banco Mundial.....	156
Tabla 12.6: Costo relacionado con la ruta.....	157
Tabla 12.7: Costo relacionado con el tiempo.....	157
Tabla 12.8: Costo relacionado con la distancia.....	158
Tabla 12.9: Pliego tarifario de UTE	159
Tabla 12.10: Costo relacionado con la alimentación	159
Tabla 12.11: Costo relacionado con la distancia.....	160
Tabla 12.12: Costos de funcionamiento.....	160
Tabla 12.13: Venta de Boletos Anual	161
Tabla 12.14: Ingreso por venta de Boletos Anual.....	161
Tabla 12.15: Costos e ingresos por año	165
Tabla 12.16: Evolución para el cálculo de los años de repago	166
Tabla 12.17: Ingreso por venta de Boletos Anual a U\$S1	166

Tabla 12.18: Costos e ingresos por año con un precio del boleto de U\$S1	167
Tabla 12.19: Evolución para el cálculo de los años de repago con el boleto a U\$S1	168

Tabla de Gráficas

Gráfica 4.1: Velocidades de operación según el medio de transporte	23
Gráfica 4.2: Cantidad de pasajeros para diferentes medios de transporte	24
Gráfica 4.3: Comparación de la capacidad de transporte de varios modos a intervalos de 180s entre cada vehículo y 21km de línea.....	25
Gráfica 4.4: Contenido atmosférico de CO ₂ en el volcán Mauna Loa.....	26
Gráfica 4.5: Emisiones de CO ₂ en 2004 por sector y subsector	27
Gráfica 4.6: Emisiones de NO _x en 2004 por sector y subsector.....	27
Gráfica 4.7: Emisiones de CO en 2004 por sector y subsector.....	28
Gráfica 4.8: Emisiones de COVDM en 2004 por sector y subsector	28
Gráfica 4.9: Emisiones de SO ₂ en 2004 por sector y subsector	28
Gráfica 4.10: Perfil de las emisiones de CO ₂ en 2006 del sector energía en el departamento de Montevideo.....	29
Gráfica 4.11: Perfil de las emisiones de GEI en 2006 en el departamento de Montevideo	29
Gráfica 4.12: Emisiones de CO ₂ de los principales medios de transporte en construcción y operación	30
Gráfica 4.13: Consumo energético del país según sectores de la economía.....	32
Gráfica 4.14: Consumo energético de Montevideo según sectores de la economía	33
Gráfica 4.15: Consumo energético del sector transporte según el tipo de vehículo.....	33
Gráfica 4.16: Venta de boletos por semana promedio en Montevideo.....	38
Gráfica 4.17: Energía consumida por semana por el tranvía	38
Gráfica 4.18: Empadronamientos en Montevideo desde 2001 hasta 2011	46

Gráfica 6.1: ¿Cómo ve la propuesta de implementar un tranvía eléctrico por Av. 18 de Julio?	64
Gráfica 6.2: ¿Cómo ve la propuesta de implementar un tranvía eléctrico por Av. Italia?.....	65
Gráfica 6.3: ¿En cuál de los siguientes medios de transporte preferiría viajar por Av. 18 de Julio?	65
Gráfica 6.4: ¿En cuál de los siguientes medios de transporte preferiría viajar por Av. Italia?.....	66
Gráfica 6.5: ¿Cuántas veces viajó en la última semana por Av. 18 de Julio?	66
Gráfica 6.6: ¿Cuántas veces viajó en la última semana por Av. Italia?.....	67
Gráfica 9.1: Curva de carga en la zona de estudio.....	95
Gráfica 10.1: Curvas de Carga de la Estación 01 con y sin tranvía.....	123
Gráfica 10.2: Curvas de Carga de la Estación 77 con y sin tranvía.....	124
Gráfica 10.3: Curvas de Carga de la Estación 04 con y sin tranvía.....	125
Gráfica 10.4: Curvas de Carga de la Estación 32 con y sin tranvía.....	126
Gráfica 10.5: Curvas de Carga de la Estación 47 con y sin tranvía.....	127
Gráfica 10.6: Curvas de Carga de la Estación 86 con y sin tranvía.....	128
Gráfica 10.7: Curvas de Carga del Centro con y sin tranvía	129
Gráfica 10.8: Curvas de Demanda con y sin las SSEE de tracción	132

Tabla de Figuras

Figura 3.1:	Primera línea de tranvías de Montevideo.....	6
Figura 3.2:	Antiguos tranvías eléctricos de Montevideo.....	7
Figura 3.3:	Aviso del cese de servicios tranviarios	9
Figura 3.4:	Red tranviaria de la época.....	10
Figura 3.5:	Plano de la red del subterráneo	12
Figura 3.6:	Artículo sobre el sistema eléctrico del subterráneo	13
Figura 3.7:	Servicios auxiliares del subterráneo.....	13
Figura 3.8:	Imagen de un trolebús.....	17
Figura 3.9:	Red general de trolebuses	18
Figura 3.10:	Datos generales del suministro de Comercio.....	19
Figura 3.11:	Datos generales del suministro de Plaza de los Olímpicos.....	19
Figura 3.12:	Ubicación de la Subestación 440	20
Figura 3.13:	Ubicación de la Subestación 739	20
Figura 4.1:	Pasajeros por hora y por sentido para diferentes medios de transporte.....	22
Figura 4.2:	Estadísticas del crecimiento de pasajeros en el tranvía de Barcelona	40
Figura 4.3:	Consumo de energía del tranvía, el autobús y el automóvil para trasladar 218 personas.....	41
Figura 4.4:	Ancho de vía requerido según el medio de transporte	42
Figura 4.5:	Número de personas que atraviesan un espacio de entre 3 y 5m durante 1 hora	42
Figura 4.6:	Capacidad de varios medios de transporte.....	43
Figura 4.7:	Secciones tranviarias.....	43
Figura 4.8:	Diferentes tipos de suelo donde funciona el tranvía	44

Figura 4.9:	Accidentes de tránsito según el medio de transporte	44
Figura 5.1:	Estructura de la alimentación a los sistemas de tracción eléctrica	49
Figura 5.2:	Circuito de retorno y aterramiento de los sistemas de tracción en DC	50
Figura 5.3:	Circuito de retorno y aterramiento de los sistemas de tracción en AC	51
Figura 5.4:	Dispositivos limitadores de tensión	53
Figura 5.5:	Sistema de alimentación de los tranvías en corriente continua..	55
Figura 5.6:	Conexión cíclica a las fases de la red de alimentación (compensación indirecta del desbalance de tensión)	58
Figura 5.7:	Esquema de funcionamiento del tranvía	60
Figura 5.8:	Imagen del pantógrafo	61
Figura 5.9:	Deformación de la línea de contacto	62
Figura 5.10:	Ilustración de catenaria, línea de contacto y perfiles de la línea de contacto	62
Figura 8.1:	Unifilar del PCyM de las subestaciones de tracción dobles	82
Figura 8.2:	Esquema de la configuración en alimentación normal de las subestaciones dobles	83
Figura 8.3:	Unifilar del PCyM en configuración N-1	83
Figura 8.4:	Esquema de la configuración N-1 de las subestaciones dobles .	83
Figura 8.5:	Zona aledaña al trayecto del tranvía	85
Figura 8.6:	Unifilar de la Estación 01	86
Figura 8.7:	Unifilar de la Estación 02	86
Figura 8.8:	Unifilar de la Estación 87	87
Figura 8.9:	Unifilar de la Estación 51	87
Figura 8.10:	Unifilar de la Estación 04	87

Figura 8.11:	Unifilar de la Estación 47	87
Figura 8.12:	Unifilar de la Estación 65	88
Figura 8.13:	Unifilar de la Estación 38	88
Figura 9.1:	Zona de estudio	91
Figura 9.2:	Esquemático asociado a ME	92
Figura 9.3:	Esquemático asociado a MJ	92
Figura 9.4:	Esquemático asociado a MF	93
Figura 9.5:	Red de 30kV y ubicación de las SSEE de tracción.....	99
Figura 9.6:	Puesto de Conexión y Medida doble o compartido	100
Figura 9.7:	Puesto de Conexión y Medida simple o individual	100
Figura 9.8:	Mapa de ubicación de las subestaciones 1 y 2.....	101
Figura 9.9:	Esquemático de referencia para determinar la inserción de las SSEE 1 y 2	102
Figura 9.10:	Flujo de carga luego de insertar las subestaciones 1 y 2.....	103
Figura 9.11:	Mapa de ubicación de las subestaciones 3 y 4.....	104
Figura 9.12:	Esquema de interconexión de las estaciones 04, 32 y MJ	105
Figura 9.13:	Flujo de carga antes de insertar las subestaciones 3 y 4	105
Figura 9.14:	Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-02.....	106
Figura 9.15:	Flujo de carga luego de insertar las subestaciones 3 y 4.....	106
Figura 9.16:	Mapa de ubicación de la subestación 5.....	107
Figura 9.17:	Esquema de interconexión de las estaciones 86, 65, 47 y ME	108
Figura 9.18:	Flujo de carga antes de insertar la subestación 5	108
Figura 9.19:	Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-03.....	109
Figura 9.20:	Flujo de carga luego de insertar la subestación 5	110
Figura 9.21:	Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-01	111
Figura 9.22:	Disyuntor a instalar en la Estación 04.....	117
Figura 9.23:	Disyuntor a instalar en la Estación 38.....	120

Figura 11.1:	Diagrama de bloques para el diseño de una Puesta a Tierra....	134
Figura 11.2:	Circuitos de tierra accidental	140
Figura 11.3:	Situaciones en las que puede estar una persona respecto a tierra durante un defecto en la subestación	140

Capítulo 1: Introducción

La idea principal del proyecto se basa en la realización de un estudio acerca de la viabilidad de implementar un tranvía eléctrico en algunas de las principales arterias de Montevideo para el transporte de pasajeros. Dicho estudio se encuentra focalizado en el diseño de la red eléctrica de tracción, dentro del cual se incluye la determinación del sistema de alimentación (tensión de alimentación, AC/DC, subestaciones de tracción, etc.) más adecuado a la coyuntura del Uruguay.

Dentro del estudio realizado, se recaba información sobre el flujo de pasajeros en las posibles trayectorias de construcción del tranvía, realizando encuestas a los usuarios y/o personas afectadas, de modo de saber qué piensan acerca de la construcción de un tranvía eléctrico. A su vez, se efectúan corridas de flujo de carga para analizar el comportamiento de la red eléctrica uruguaya ante la nueva demanda, determinando de esta forma la configuración de las subestaciones de tracción más conveniente de forma de mitigar el problema en cuestión, elaborando las especificaciones técnicas correspondientes y un mapa con la posible ubicación de las mismas según los espacios físicos con los que se cuenta en la actualidad.

Asimismo, se analizan distintas tecnologías de tracción eléctrica a utilizar, incluyendo las ventajas y desventajas de las mismas. Un estudio económico sobre la tecnología de tracción elegida y sobre la viabilidad de la solución en función del flujo de pasajeros también es llevado a cabo.

Por otro lado, se comparan otros proyectos similares y primeras experiencias de introducción del transporte eléctrico llevadas a cabo en otros países, así como también se ve el impacto en el uso de los recursos energéticos, es decir la eficiencia de esta tecnología, comparándola respecto a los medios de transporte utilizados tradicionalmente.

Se lleva a cabo la realización del anteproyecto de infraestructura de media tensión para alimentar el tranvía, así como también se realiza un estudio sobre el impacto que este medio de transporte tendría en la demanda de energía eléctrica y en la curva de carga.

La construcción de un tranvía eléctrico en Montevideo facilitaría el traslado de las personas, descongestionando el tránsito en la ciudad y, tal vez, reduciendo el número de accidentes de tránsito. Asimismo, al ser eléctrico, se reduce la contaminación ambiental. Lo que se intenta hacer es que los ciudadanos comiencen a utilizar el transporte colectivo de pasajeros, disminuyendo la cantidad de automóviles que circulan por la ciudad.

Capítulo 2: Historia del Tranvía

El tranvía es un medio de transporte de pasajeros que circula sobre carriles y por la superficie en áreas urbanas, en las propias calles, sin separación del resto de la vía ni senda o sector reservado. En algunos casos la vía férrea del tranvía puede transitar por vías públicas exclusivas y hasta cubrirse de césped, integrándola aún más al paisaje urbano.

Los primeros servicios ferroviarios de pasajeros en el mundo se iniciaron en 1807 en Gales, los cuales usaban carruajes especialmente diseñados en una línea de tranvía tirados por caballos construidos para el uso del transporte de mercancías.

El tranvía se volvió popular debido a dos características principales:

- La tracción animal (caballos o mulas) podía arrastrar más peso gracias a la característica básica que posibilitó el desarrollo del transporte por ferrocarril: el bajo coeficiente de rozamiento entre rieles y rueda que permite un consumo energético mucho menor respecto a los transportes sobre pavimento con ruedas.
- La superficie de los rieles era mucho más lisa que la de las calles y carreteras de la época, lo cual hacía mucho más suave la marcha que la de los carruajes corrientes.

Tras la tracción a sangre, se intentó la tracción a vapor, como los ferrocarriles, mediante una pequeña máquina de vapor, pero las molestias causadas por los humos y el vapor hicieron que este sistema fuese popular únicamente en tranvías que circulaban por el campo.

El primer tranvía eléctrico fue puesto en servicio en Berlín en 1879, demostrando definitivamente que la tracción eléctrica era la mejor forma de propulsar los tranvías.

El tranvía tuvo un desarrollo considerable entre comienzos del Siglo XX y el período de entreguerras, con la multiplicación de las vías y el incremento de los pasajeros que los utilizaban, convirtiéndose en el principal transporte urbano de la época. Pero a partir de 1935, el desarrollo de la venta de vehículos y el progreso técnico

del autobús, el cual resultaba más ágil en el tránsito urbano y contaba con una infraestructura menos costosa, entrañan en algunas ciudades la veloz desaparición del tranvía. Las redes tranviarias desaparecieron casi completamente en varios países del mundo, mientras que en otros se mantienen y hasta se modernizan.

Actualmente el tranvía se encuentra en una situación de fuerte recuperación en Europa. El inicio de este renacimiento se dio en Francia tras la crisis del petróleo en 1973 y la saturación de las ciudades por parte de los automóviles. A partir de allí se construyen redes tranviarias nuevas en varias ciudades francesas. El éxito de estos proyectos ha provocado que numerosas ciudades de Europa estudien la posibilidad de implementar sistemas similares.

Los nuevos tranvías, gracias al gran avance tecnológico, se han convertido en un nuevo medio de transporte público con un alto nivel de prestaciones gracias a su accesibilidad, baja acústica, rapidez, regularidad, comodidad y ecología. El principal objetivo del tranvía es garantizar la accesibilidad en las ciudades bajo unas condiciones respetuosas con el ambiente. A la vez, constituye una alternativa interesante para los usuarios y una apuesta decidida por el transporte público en la línea de los criterios de fomento de la economía en el entorno urbano.

La mayor parte de las veces los tranvías utilizan un perfil de riel especial, denominado “de garganta” o carril tipo “Phoenix”. Este tipo de riel especial permite pavimentar a ambos lados de los mismos y hasta su nivel superior, posibilitando la circulación de automóviles sin perder espacio del lado interno destinado a la pestaña de las ruedas del tranvía. Cuando éste circula por una vía separada del tránsito vehicular, se suele utilizar el mismo tipo de carril que los trenes.

La energía eléctrica la toman de la línea aérea de contacto, la cual puede ser un alambre de cobre en suspensión simple denominado “hilo trolley” o por catenaria. Esta energía la toman mediante un trole de pértiga, un pantógrafo o un arco raspante.

Actualmente, existen sistemas tranviarios que no utilizan un cable de contacto de donde obtienen la energía eléctrica.

Los sistemas más empleados para la sustitución del hilo tranviario son los siguientes:

- Empleo de un tercer riel electrificado, utilizado en entornos urbanos.
- Acumulación de energía a bordo para circular en forma autónoma. Este sistema permite la circulación sin hilo tranviario en pequeños tramos del recorrido, cargando los acumuladores durante la circulación normal bajo hilo tranviario.
- Acumulación de energía en baterías de carga rápida. Este sistema permite la circulación sin hilo aéreo en grandes distancias, cargando los acumuladores mientras el tranvía se encuentra en la parada.
- Acumuladores de energía por medios mecánicos. Estos sistemas acumulan la energía de frenado en un volante de inercia.

[104]

Capítulo 3: Antecedentes Nacionales

3.1. Tranvía eléctrico

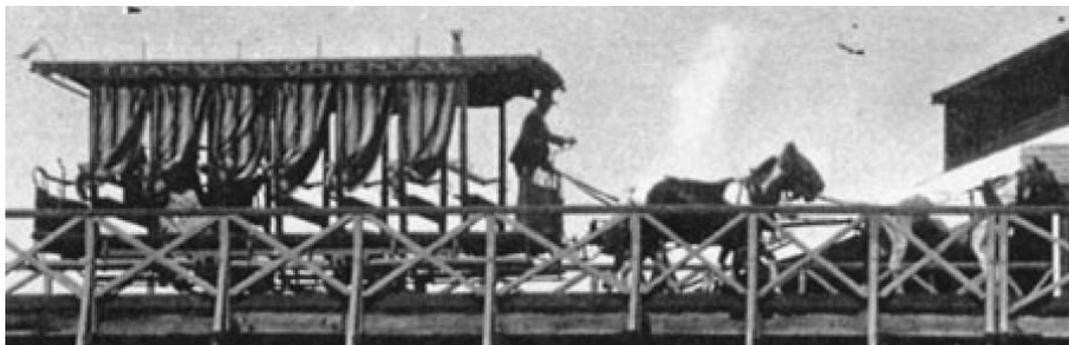


Figura 3.1: Primera línea de tranvías de Montevideo[54]

1868 - El 25 de Mayo era inaugurada la primera línea de tranvías a caballos de la ciudad. Dicha línea unía el Centro y la Unión, establecida por la compañía del "Tranvía a la Unión y Maroñas". El servicio público comenzó el 1^o de Junio siguiente. Llegaron a funcionar en la ciudad trece empresas de tranvías de tracción a sangre. La extensión de las líneas facilitó el crecimiento de la ciudad, determinando la aparición de nuevos barrios, creando lazos directos y permanentes con el Centro. Existieron dos líneas de tranvías locales en Montevideo:

- El tranvía "Al Prado", que circuló entre 1873 y 1888 desde Agraciada y Lucas Obes hasta Buschental y el Arroyo Miguelete, siendo utilizado para llevar paseantes al interior del Prado.
- El tranvía de Giot, establecido en 1872 para unir la estación Colón del Ferrocarril Central con Lezica. Funcionó hasta que fue sustituido por la línea 41 de tranvía eléctrico en 1912.

El sistema de caballos tuvo su auge desde 1893 a 1897 (en 1895 se registró la primera huelga de tranviarios), cuando llegaron a operar 13 empresas de tranvías en Montevideo. Durante el gobierno de Juan Idiarte Borda (1894 – 1897) se llegó a transportar en un año a 17.000.000 de pasajeros; el personal ocupado llegó a 1.092 trabajadores, con un parque de 511 coches, 3.984 caballos y 14 estaciones.

1896 - Se instaló en la ciudad la "Sociedad Comercial de Montevideo", subsidiaria del consorcio británico Atlas. Tenía como finalidad adquirir líneas de tranvías a caballos para unificarlas y electrificarlas. Casi simultáneamente se instaló "La Transatlántica", filial de la empresa alemana A.E.G., con cometidos semejantes.

1906 – El 19 de Noviembre fue inaugurada por la "Sociedad Comercial de Montevideo" (S.C. de M.) la primera línea de tranvías eléctricos de Montevideo, la cual circulaba entre la Aduana y Pocitos. Los servicios regulares comenzaron el 8 de Diciembre del mismo año.

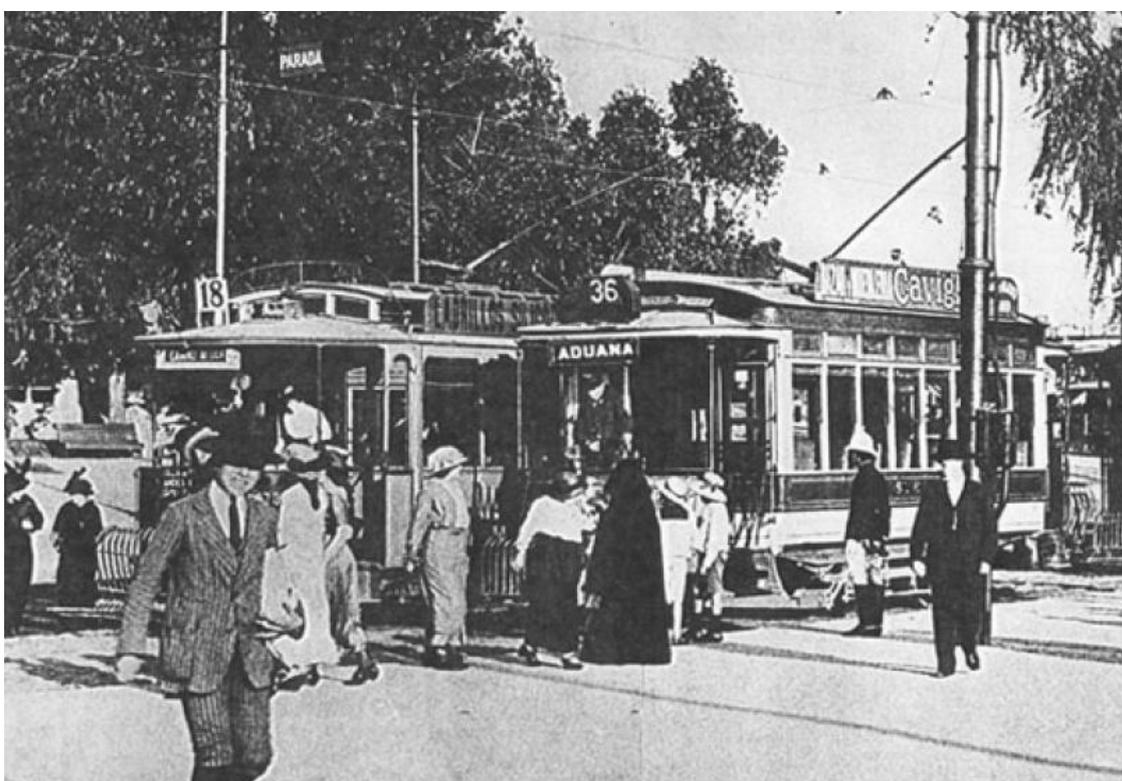


Figura 3.2: Antiguos tranvías eléctricos de Montevideo[54]

1907 – El 2 de Junio La Transatlántica, por su parte, comenzaría sus servicios en la línea entre la Aduana y el Paso Molino.

1910 - Finalizó la electrificación de las líneas de tranvía, a excepción del "Tranvía y Ferrocarril del Norte", que describía un amplio circuito por el Centro con ramales al Reducto y al Paso Molino, y combinando con el ferrocarril (propiedad de la misma empresa) a Santiago Vázquez en la Estación del Norte. En **1915** pasó

aserepropiadad del Estado y desapareció, después de fracasar todos los intentos de electrificación, el 31 de Diciembre de **1925**.

La tracción eléctrica significó un cambio importante en la vida de la ciudad. De la velocidad de trote del caballo se pasó a los 40km/h del tranvía eléctrico en zona urbana y 60km/h en zonas suburbanas.

1924 - Los FF.CC. del Estado llegaron a un acuerdo con La Transatlántica para cubrir el servicio de pasajeros de la línea de ferrocarril a la Barra de Santa Lucía, que había perdido sus tráficos de cargas más importantes: carne y arena. La Transatlántica aportaba el personal, los coches y sus vías desde el Centro hasta Llupes y Agraciada (Belvedere), donde se construyó un empalme con la vía férrea que había sido electrificada. El servicio de esta línea, conocida como "E" (única que no llevaba un número), se inauguró el 15 de Diciembre de **1926** y alcanzó un éxito notable. De tres trenes mixtos por día se pasó a un tranvía cada 40 minutos.

Los diez coches más grandes de la empresa (N° 151 a 160) fueron condicionados para prestar servicios en la línea "E". Se los dotó de faros en el techo y carteles distintivos, más tarde se le colocaron dos troles. En muchas oportunidades, era necesario poner en servicio todos los coches, que en la zona rural llegaban a desarrollar una velocidad de 90km/h.

1928 - La Sociedad Comercial adquirió a La Transatlántica, realizándose la fusión completa en **1933**. Esto provocó cambios en los trazados de vías y en los servicios, así como en el color de los coches.

1947 - El 29 de Diciembre nació la Administración Municipal de Transportes Colectivos de Montevideo, más conocida como AMDET, que tomó a su cargo los tranvías como parte de pago de la deuda de guerra que Gran Bretaña tenía con Uruguay para suprimirlos y reemplazarlos por una red de subterráneo, trolebuses, autobuses y microbuses que nunca llegó a completarse ni a suplirlos eficazmente.

1948 - AMDET realizó el primer abandono de vías en Febrero en la Ciudad Vieja, siendo después las 61 líneas progresivamente sustituidas por trolebuses (16 líneas fueron instaladas entre **1951** y **1959**), autobuses y microbuses.

1956 - El 17 de Noviembre eran suprimidos los servicios de tranvías urbanos de Montevideo. Subsistían en ese momento siete líneas (9, 10, 11, 12, 28, 55, 61, todas sin cubrir completamente sus recorridos), manteniéndose solo un tramo de la línea suburbana, entre Belvedere y La Barra de Santa Lucía.

**ADMINISTRACION MUNICIPAL
DE TRANSPORTES COLECTIVOS DE MONTEVIDEO
AMDET**

AVISO AL PUBLICO

Ampliaciones, Modificaciones y Supresiones de Servicios

Se pone en conocimiento del público que, prosiguiendo con los planes trazados por este Organismo, el próximo domingo 18 del corriente mes, se pondrá en circulación la línea de trolebuses N° 4, que unirá la Curva de Maroñas con la Aduana, por las avenidas 8 de Octubre y 18 de Julio. El recorrido completo de esta línea será el siguiente: desde avenida 8 de Octubre y Pirineos, por la avenida 8 de Octubre, avenida 18 de Julio, Plaza Independencia, Sarandi, Pérez Castellano, Piedras hasta Ingeniero Monteverde; regresando por Rambla Franklin D. Roosevelt, Colón, Buenos Aires, Plaza Independencia, avenida 18 de Julio, avenida 8 de Octubre hasta Curva de Maroñas.

Esta línea dará y recibirá las mismas combinaciones con los servicios de micro-ómnibus, que al presente se cumplen con la línea de autobuses N° 72.

El mismo día 18, se establecerán dos nuevos servicios de autobuses, que unirán el Palacio de la Luz con el Parque Rodó. Esas dos líneas llevarán los Nos. 17 y 18, y cumplirán los siguientes recorridos:

Línea N° 17. — desde Paraguay y Caraballo, por ésta, avenida Agraciada, Palacio Legislativo, Madrid, Sierra, Nicaragua, Magallanes, Gonzalo Ramírez, Julio Herrera y Reissig a Playa Ramírez; regresando por Julio Herrera y Reissig, Gonzalo Ramírez, Minas, Nicaragua, Sierra, Palacio Legislativo, avenida Agraciada, Aguilar, Paraguay hasta Caraballo.

Línea N° 18. — desde Paraguay y Caraballo, por ésta, avenida Gral. Rondeau, Gral. Aguilar, avenida Millán, Blandengues, Defensa, Martín García, Juan Paullier, Gonzalo Ramírez, Julio Herrera y Reissig, a Playa Ramírez; regresando por el mismo recorrido.

Al inaugurarse la línea N° 4 de trolebuses, quedarán suprimidas las líneas Nos. 71 y 72, de autobuses. El servicio que cumple la línea N° 71 por la avenida Centenario, será prestado, a partir del mismo día, con micro-ómnibus, que llevarán el mismo N° 71, y que circularán desde el Camino Corrales hasta 8 de Octubre y Larrañaga. La nueva línea de micro-ómnibus N° 71, dará y recibirá boletos de combinación con la línea de trolebuses N° 4, combinaciones que se cumplirán en la avenida 8 de Octubre y Larrañaga.

El servicio de micro-ómnibus que al presente se cumple con el N° 72, desde Pirineos hasta Punta de Rieles, pasará a individualizarse con el N° 4. Los micro-ómnibus de esta línea serán los que prestarán el servicio nocturno de la línea de trolebuses N° 4, por las avenidas 8 de Octubre y 18 de Julio.

Asimismo y como se había anticipado por comunicado anterior, el próximo sábado 17, a partir de las 14 horas, quedarán suprimidas definitivamente las líneas de tranvías con excepción del servicio a Santiago Vázquez.

Montevideo, Noviembre de 1956.

LA GERENCIA

Figura 3.3: Aviso del cese de servicios tranviarios [54]

1957 - A la 1 de la mañana del 14 de Abril, con la llegada a Belvedere del coche N° 159, cesaban los servicios de los tranvías eléctricos de Montevideo.

[54]

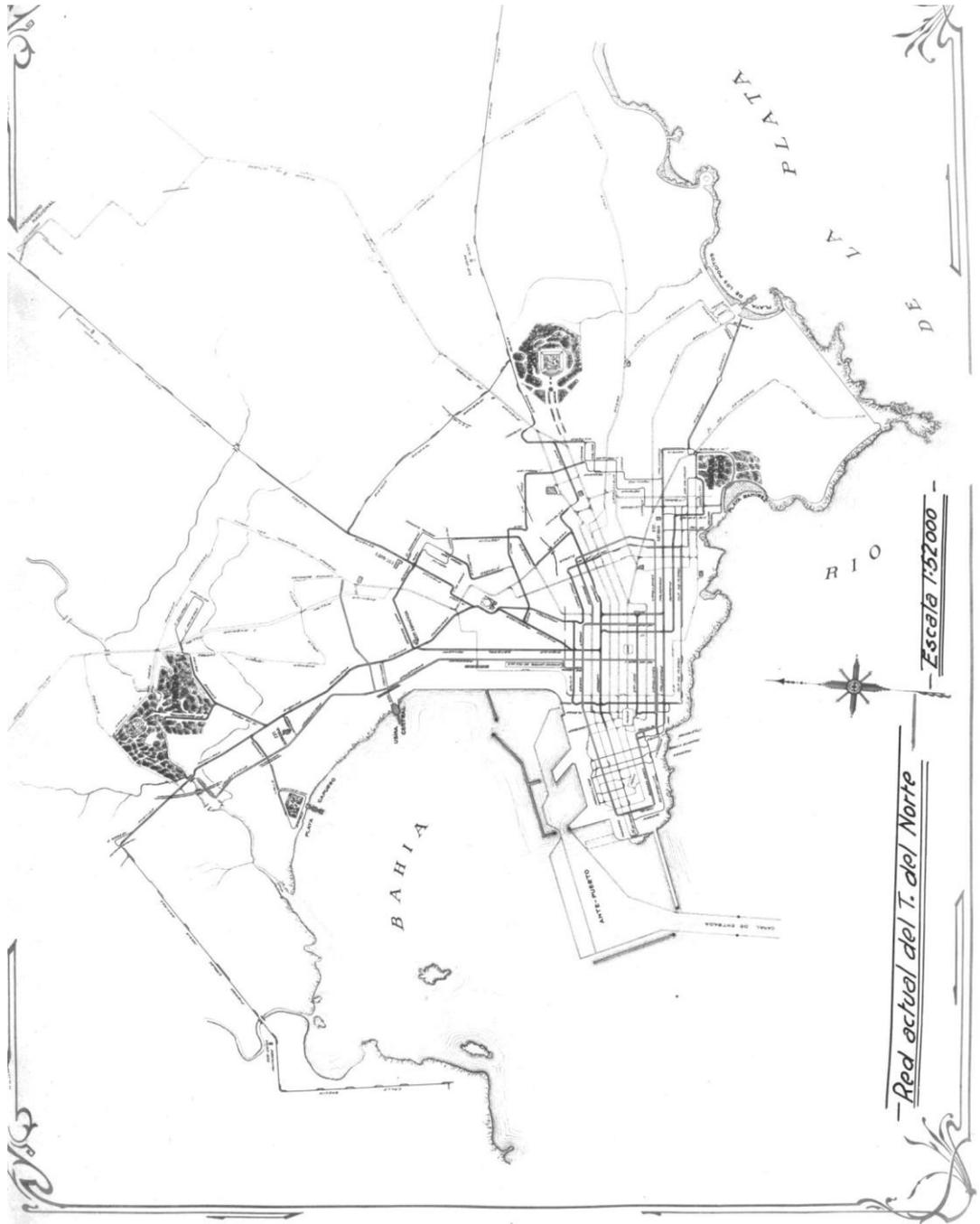


Figura 3.4: Red tranviaria de la época[105]

3.2. ¿Por qué desaparecieron?

Los tranvías desaparecieron debido a la sobrecarga a la que fueron objeto durante la Segunda Guerra Mundial, la que provocó que los materiales (vías y coches) debieran ser renovados en la década del 50, pero se fomentó su reemplazo por trolebuses o autobuses. Esto fue un error, ya que los otros sistemas no tienen la misma capacidad de transporte, es decir, por hora y dirección los tranvías pueden movilizar más pasajeros con la misma o menor cantidad de vehículos. Además, los trolebuses desaparecerían de muchas ciudades una década después utilizándose los mismos argumentos que se usaron en contra de los tranvías.

Se decía que el tranvía era ruidoso, molesto, anacrónico, lento, cuando en realidad el problema fue que los materiales estaban desgastados debido al intensivo uso que se le dio durante la Segunda Guerra Mundial y a la falta de inversión de las empresas propietarias, puesto que ya no estaban interesadas en el negocio. El trazado de vías en las calles no se modificó con el incremento del tráfico automotor, por lo que los tranvías debían detenerse a levantar pasajeros impidiendo el paso de otros vehículos, ya que las vías en la mayoría de los casos se encontraban en el centro de la calzada y no contra las veredas.

Desafortunadamente, en lugar de realizarse una modernización de los sistemas tranviarios, se prefirió suprimirlos. Incluso en algunas ciudades como Río de Janeiro o Lima (además de muchas ciudades norteamericanas), los tranvías prestaban eficientes servicios con vehículos modernos. Aún así, debido a la "moda" de reemplazarlos con trolebuses o autobuses supuestamente más "flexibles" (pero con menor capacidad de transporte y propensos a atascarse en los embotellamientos), fueron eliminados.

[54]

3.3. Antecedentes de proyecto de subterráneo en Montevideo

Dentro de los diferentes proyectos que alguna vez fueron impulsados y quedaron en el olvido, entre los años 1948 y 1950 se presentó una iniciativa francesa de construir un metro para unir la Ciudad Vieja con la Curva de Maroñas. A pesar de que este proyecto nunca llegó a concretarse, a continuación se presentan un plano con la red de subterráneo que se pretendía crear, así como también un artículo de la revista “Revista de ingeniería” del 6 de Enero de 1951 en donde se explica el sistema eléctrico del que iba a disponer el proyecto:

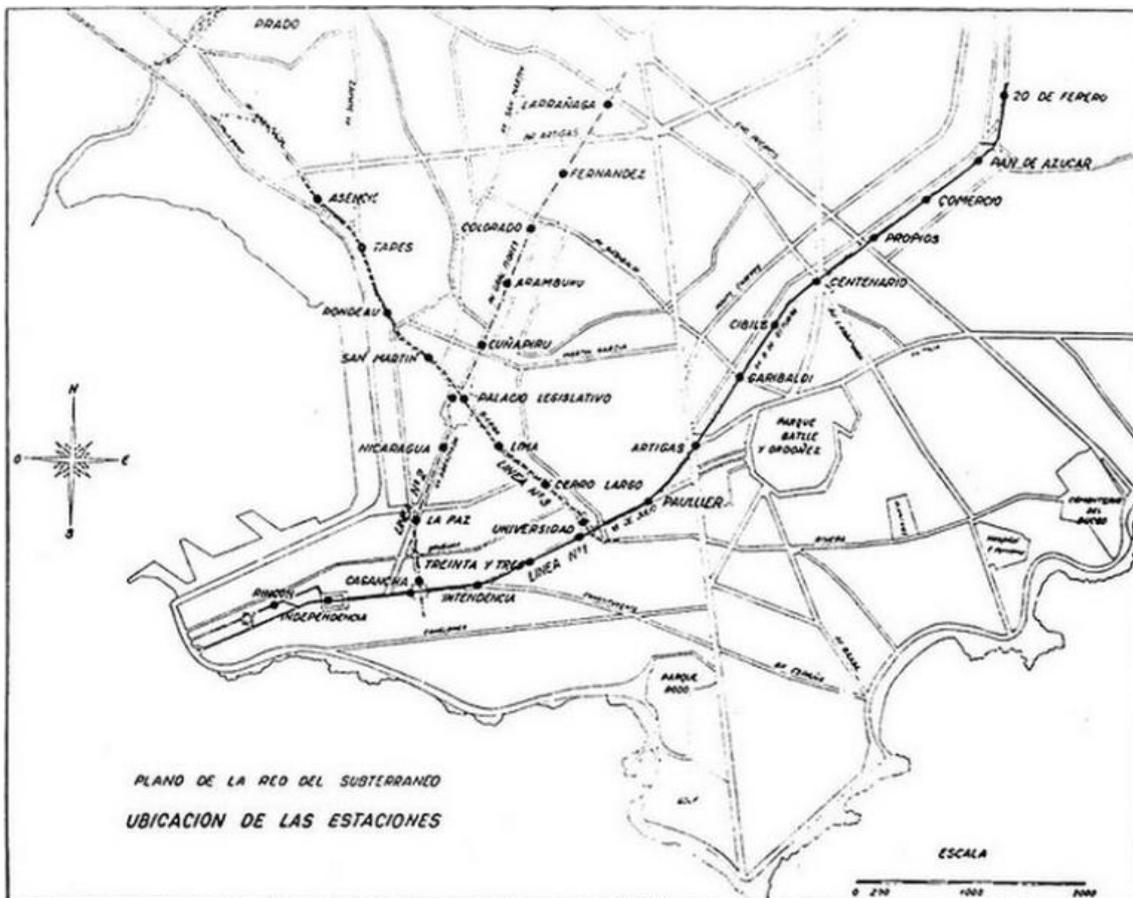


Figura 3.5: Plano de la red del subterráneo [38]

Equipo eléctrico

Distribución de la energía. — La energía eléctrica será proporcionada por la U.T.E. a la tensión de 31.500 Volts.

La distribución de la energía será asegurada por un puesto de comando situado próximo al Palacio Legislativo, centro de gravedad de las tres líneas proyectadas.

De este puesto de comando partirán los feeders que alimentarán las dos subestaciones de la línea Nº 1, situados en la Intendencia y en Propios.

Las subestaciones no tendrán ningún personal de vigilancia.

Su funcionamiento será asegurado por un comando a distancia desde el puesto del Palacio Legislativo, que comprenderá igualmente dos transformadores de 31.500/6.300 V.; uno en servicio y el otro en reserva para la alimentación de los servicios auxiliares (iluminación, señalización, ventilación, evacuación de las aguas, etc.).

Ellas comprenden igualmente un grupo electrógeno Diesel de 500 VC, pudiendo servir de emergencia para los servicios auxiliares esenciales en caso de interrupciones de la UTE.

Las subestaciones estarán cada una equipadas por tres grupos de rectificadores a vapor de mercurio de 1750 kW., transformando los 31.500 V de corriente alterna en 750 V continua.

La corriente de tracción será distribuida por tercer riel, de 75 kg. por metro. Se ha previsto igualmente un trolley para los servicios de emergencia (la corriente proporcionada por ese trolley permitirá hacer marchar un tren a la velocidad reducida de 25 km. por hora); la toma de corriente por trolley facilita el trabajo sobre la vía en caso de descarrilamiento o de trabajos nocturnos.

Figura 3.6: Artículo sobre el sistema eléctrico del subterráneo[74]

Servicios auxiliares. — Próximos a cada estación se han previsto 2 puestos de transformación que transforman la corriente 6.300 V en 220 V para los servicios auxiliares. Cada uno se compone, en principio, de un transformador para la señalización; otro para la iluminación, las bombas y la ventilación, y, eventualmente, un tercero para los motores de las agujas.

Figura 3.7: Servicios auxiliares del subterráneo[74]

3.4. Antecedentes del trolebús en Montevideo

29/12/1947 - Nace la Administración de Transportes Colectivos de Montevideo, empresa municipal creada por la compra, por parte del municipio, de la empresa tranviaria Sociedad Comercial de Montevideo y de las empresas de autobuses AMSA y TUSA. Planeaba sustituir los tranvías por una red de trolebuses, ómnibus y microbuses.

13/12/1950 -El directorio de AMDET anunció el plan para la red general de trolebuses de Montevideo. Este plan nunca se cumpliría en su totalidad. Algunas líneas finalmente se instalaron con números diferentes, otras se sirvieron con ómnibus, varias nunca se establecieron y se instalaron secciones no planificadas originalmente.

28/03/1951 - Se inauguraba la primera línea de trolebús, la 62 Ciudadela-Pocitos. Los primeros 18 coches eran BUT británicos, numerados del 2001 al 2018.

22/07/1951 - Se inauguró la segunda línea entre Ciudadela y Buceo, numerada 63. A medida que se instala la red aérea y se reciben nuevos coches se suprimen más líneas de tranvía para sustituirlos por trolebuses.

04/11/1954 - Llegan los primeros 5 trolebuses Alfa Romeo-Fiat-CGE modelo "Montevideo". Durante el año 1955 llegarían vehículos similares hasta alcanzar un total de 250 unidades, numeradas del 2019 al 2268.

17/11/1954 - La línea 63 llega a Malvín. La prolongación es inaugurada con los recién llegados Alfa Romeo.

15/05/1955 - Se suprime la línea de tranvía número 35 (Aduana-Punta Carretas), así como muchas otras. Ese mismo día se inauguraba la línea 64 de trolebuses entre Ciudadela y Malvín vía Avenida Italia.

15/08/1955 - Se inauguraba la línea 65, siendo la primera en partir desde la Aduana. Tenía como destino Trouville y fue suprimida el 15 de Marzo de 1975.

06/12/1955 - Se inauguraba la línea 66 entre la Aduana y Sayago. Esta línea sería la última de AMDET, desapareciendo el 1 de Febrero de 1976. El 13 de Diciembre siguiente comenzaba a circular la 67.

28/12/1955 - Se inaugura la línea 68 desde Buceo hasta Sayago vía el Palacio Legislativo, prolongándose posteriormente a Malvín.

22/08/1956 - Es inaugurada la línea 83 entre Trouville y Belvedere con recorrido por Constituyente, Fernández Crespo y Agraciada.

25/08/1956 - Comienza a funcionar la línea número 3 entre Aduana y el Hipódromo por la Avenida General Flores y el 20 de Noviembre la línea 5 entre Ciudadela y Gral. Flores e Industria por la calle Mercedes, siguiendo la ruta de la línea 3. Estas líneas fueron deselectrificadas en 1969 y realizadas con autobuses de AMDET hasta el 15 de Mayo de 1975.

17/11/1956 - Se suprimen las últimas siete líneas urbanas de tranvías (9, 10, 11, 12, 28, 55 y 61), todas sin cubrir completamente sus recorridos debido a la supresión de tramos comunes a otras líneas. Hasta Abril del año siguiente continuaría circulando la única línea suburbana, conocida como "E", entre Belvedere y Santiago Vázquez.

18/11/1956 - Se inauguraba la línea 4 entre Aduana y Curva de Maroñas, siendo esta la primera línea de trolebús en circular por la Avenida 18 de Julio. No se habían instalado trolebuses en el eje 18 de Julio-8 de Octubre debido al *proyecto de construcción de una línea de subterráneo*, el cual fue abandonado por motivos políticos.

20/12/1956 - Aparece la línea más larga, la 70, entre Belvedere y la intersección de Av. Italia y Comercio. Posteriormente fue prolongada hasta Malvín y a Plaza Lafone, y después a Curva de Grecia primero y finalmente hasta la terminal Cerro, llegando a una extensión de 46 km. Dejó de circular en Noviembre de 1975 siendo sustituida por la línea 370 de UCOT.

26/01/1957 - Aparece la 75 Aduana-Cerro, primero terminando en Plaza Lafone y después en Curva de Grecia a medida que se tendían las líneas aéreas. Fue suprimida el 15 de Julio de 1975.

La línea 81 circuló entre Febrero de 1957 y Junio de 1966 entre la Aduana y el Cementerio del Norte, haciendo un recorrido similar a la línea 96 inaugurada en Octubre que por la Avenida San Martín llegaba hasta el mismo destino pero desde la terminal Ciudadela. Esta última línea fue suprimida el 15 de Julio de 1975, siendo reemplazada por la 396 servida por autobuses de UCOT.

14/04/1957 - A la hora 01:00 era suprimida la última línea de tranvía de Montevideo, la "E" que circulaba entre el pueblo Santiago Vázquez y Belvedere en la periferia de Montevideo. Los coches de esta línea se guardaban en la Estación Agraciada ubicada mucho más cerca del centro de la ciudad, por lo que se conservaban las vías y red aérea hasta la misma.

16/09/1959– AMDET inaugura su última línea: la 60. La misma hacía el recorrido entre Aduana y Malvín por 18 de Julio y la Av. Rivera. Esta línea fue una de las últimas 4 en circular bajo la administración de COOPTROL, siendo suprimida el 26 de Enero de 1992.

1963 - Llegan 50 trolebuses simples y 40 articulados marca Ansaldo San Giorgio de Italia. El 9 de Noviembre de ese año, 4 trolebuses articulados son probados por las Avenidas Millán y San Martín.

1968 - Circula el primer coche por el túnel de 8 de Octubre y, al año siguiente, por falta de vehículos en servicio, desaparecen las líneas de trolebús de la Avenida General Flores.



Figura 3.8: Imagen de un trolebús[89]

25/10/1975 - Nace COOPTROL (Cooperativa de Trolebuses), que tomó a su cargo 4 líneas de la red (4, 60, 62, 64), con 50 coches simples y 22 articulados, todos ellos Ansaldo. AMDET cede las líneas de las otras avenidas a cooperativas existentes o nuevas.

01/02/1976 - Finalmente, a las 00:12hs, con la entrada a la Estación Reducto del trolebús 2263, desaparece AMDET. 72 trolebuses Alfa Romeo en servicio son rematados junto al resto para ese entonces fuera de servicio.

1981 - Llega un moderno trolebús brasileño, proveniente de la "Compañía Municipal de Transportes Colectivos" de Sao Paulo, y es probado durante 90 días a partir del 27 de Enero en la red de COOPTROL. Si bien se pensaba adquirir cincuenta unidades, esto nunca se concretó por diferentes motivos.

26/01/1992 - Desaparecen los trolebuses al revocar el municipio el permiso de circulación de COOPTROL. La "Asociación Uruguaya Amigos del Riel" y la "Federación Americana de Amigos del Riel y la Tracción Eléctrica" recorrieron por última vez todas las líneas ese día en el trolebús número 29. El último coche en servicio fue el 44, que cerró más de 40 años de historia al llegar a la Estación Buceo a las 22:50.

14/09/1992 - Son rematados los trolebuses para saldar las deudas que COOPTROL mantenía con sus acreedores. 31 trolebuses son adquiridos por la empresa Expreso Emir de la ciudad de Córdoba para utilizar sus partes mecánicas y eléctricas para carrozar nuevas unidades, proyecto que finalmente no se concretó debido a la quiebra de la empresa Emir. El trolebús número 28 fue transportado completo a Córdoba y allí permanece abandonado y vandalizado desde ese entonces. El coche 29 fue donado por Expreso Emir a la Asociación Uruguaya Amigos del Riel para su museo del transporte en formación, pero por inercia municipal sumada a la dejadez de la asociación, no se ha conseguido un local fijo para la institución. En un local del Barrio Sur de Montevideo, el trolebús 29 corrió con similar suerte que el 28, aunque sin llegar a los extremos de este último. El resto de los trolebuses fue desguazado o utilizado como oficinas móviles de compañías de construcción.[89]

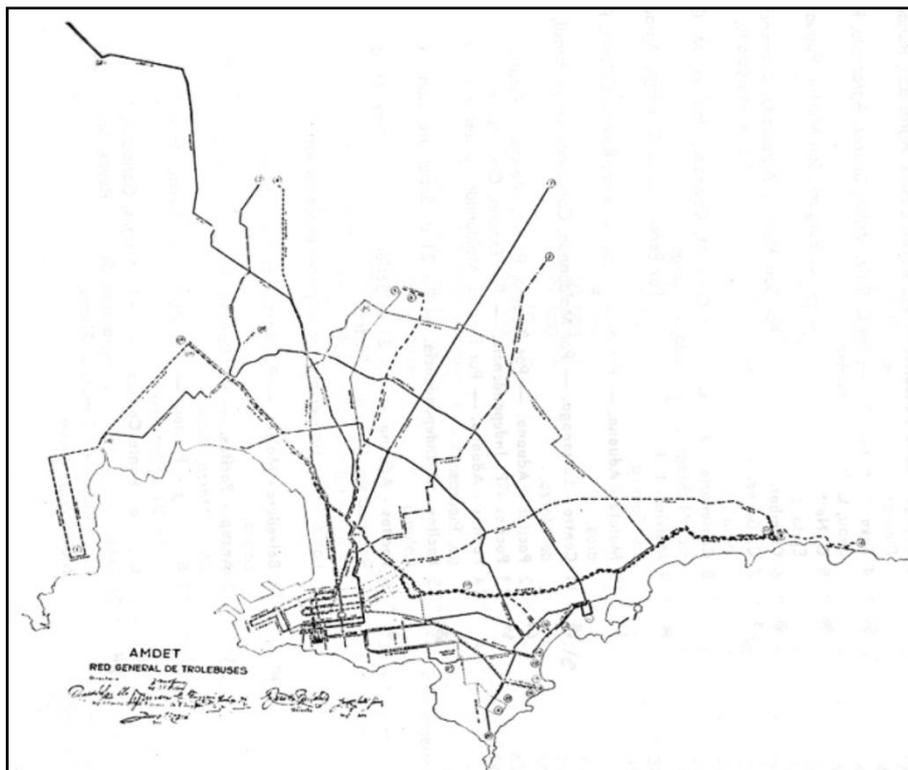


Figura 3.9: Red general de trolebuses[89]

Sistema eléctrico

Los trolebuses eran alimentados desde la red de 6kV. Las subestaciones de tracción que éstos tenían, luego de una etapa reductora de transformación, rectificaban alimentando al sistema de catenarias con una tensión de 600V en continua. No se logró averiguar exactamente qué potencia tenían estas subestaciones debido a que, en esa época, la UTE no registraba la gran cantidad de datos técnicos tan eficientemente como lo realiza hoy en día debido a la ausencia de recursos informáticos (muchas veces los registros eran hechos “a mano”). De todas maneras, actualmente existen algunos registros en el Sistema de Gestión de Comercial (software de base de datos) de los últimos suministros asociados a COOPTROL donde, entre otros datos, se indica la potencia que tenía contratada el cliente, así como también la fecha de alta y de baja del suministro.

```
*** SUM. ESTRATEGICO ***
NIS : 900540301 NUM. CARPETA :
DOM. SUMINISTRO: COMERCIO 2507 MI-
MONTEVIDEO MONTEVIDEO
CLIENTE: COOPTROL ,
TFNO: - FAX: C.N.A.E. : 7112 TRANSPORTE TERESTRE
NUM.DE CONTRATO : 61311990000678
F.ALTA SUMINIST. : 01-07-1981 EST.CONTR: 25 ALTA,SUM.SUSP.IMPAGO
F.BAJA CONTRATO : 02-03-1994 PERIODO LECTURA : 1 MENSUAL
TIPO LOCAL : PERIODO FACT. : 1 MENSUAL
TIPO SUMINISTRO : 11 NORMAL POT. PAG. CONTRIB.: 1000000 W.
TARIFA : A20 FIRMA CONTRATO :
POT.CONTRATADA : 1000000 W. COEF.REACT.FIJO :
POT.HORAS VALLE : COEF.HOR.FIJO :
NUM. INCIDENCIAS: 1 HORAS UTIL.FIJAS :
NUM.RECLAM.PTES.: 0 CONSUMO FIJO :
N.ORD.SERV.PTES.: 0 CONSUMO PENDIENTE :
CARG. VAR. PTES.: 0 NUM.ANOMALIAS PTES: 0
FECHA DE CORTE : 27-01-1994 VENC. PACTADO :
CANT.PREC.ROTOS :
```

Figura 3.10: Datos generales del suministro de Comercio[98]

```
CONSULTA DE DATOS GENERALES DEL SUMINISTRO
*** SUM. ESTRATEGICO ***
NIS : 900475901 NUM. CARPETA :
DOM. SUMINISTRO: PLZA DE LOS OLIMPICOS 1 -
MONTEVIDEO MONTEVIDEO
CLIENTE: COOPTROL ,
TFNO: - FAX: C.N.A.E. :
NUM.DE CONTRATO : 61211990000219
F.ALTA SUMINIST. : 01-07-1981 EST.CONTR: 25 ALTA,SUM.SUSP.IMPAGO
F.BAJA CONTRATO : 23-02-1994 PERIODO LECTURA : 1 MENSUAL
TIPO LOCAL : PERIODO FACT. : 1 MENSUAL
TIPO SUMINISTRO : 11 NORMAL POT. PAG. CONTRIB.: 1200000 W.
TARIFA : A20 FIRMA CONTRATO :
POT.CONTRATADA : 1200000 W. COEF.REACT.FIJO :
POT.HORAS VALLE : COEF.HOR.FIJO :
NUM. INCIDENCIAS: 3 HORAS UTIL.FIJAS :
NUM.RECLAM.PTES.: 0 CONSUMO FIJO :
N.ORD.SERV.PTES.: 0 CONSUMO PENDIENTE :
CARG. VAR. PTES.: 0 NUM.ANOMALIAS PTES: 0
FECHA DE CORTE : VENC. PACTADO :
```

Figura 3.11: Datos generales del suministro de Plaza de los Olímpicos[98]

También queda un registro impreso de la ubicación de las subestaciones de tracción (las cuales por supuesto fueron suprimidas) en una libreta que antes era usada para ubicar estaciones y subestaciones. A continuación se muestra la ubicación de algunas de ellas:



Figura 3.12: Ubicación de la Subestación 440

Se puede apreciar en la Figura 3.12 que la SB440 ahora es la SB4772, es decir, se remodeló la subestación, aprovechando el espacio físico.



Figura 3.13: Ubicación de la Subestación 739

Como se desprende de la Figura 3.13, la SB739 se suprimió, pero aún conserva la vieja fachada de AMDET (actualmente funciona en el local un centro comunal zonal).

[98]

Capítulo 4: Comparación con otros medios de transporte

4.1. Introducción

El tener un sistema de transporte eficiente, seguro, barato y amigable con el ambiente es uno de los objetivos de cualquier ciudad. Es por ello que, a la hora de planificar una inversión de estas características, se deben considerar cuidadosamente los diferentes aspectos de la ciudad en cuestión (como ser la densidad demográfica, el crecimiento del parque vehicular, reglamentaciones urbanísticas, etc.) y las características de los medios de transporte existentes de forma de escoger el más conveniente.

Dentro de las características fundamentales de los diferentes medios de transporte de pasajeros se encuentran:

- La capacidad de pasajeros
- El impacto ambiental
- El consumo energético
- El aprovechamiento del espacio urbano
- La seguridad

A continuación se analizan comparativamente dichas características discriminando según el medio de transporte.

4.2. Capacidad de transporte

La principal característica que determina si un medio de transporte de pasajeros es adecuado o no para un determinado trayecto es la cantidad de pasajeros que circulan en dicho trayecto por hora y por sentido.

En la Figura 4.1 se muestran los rangos aproximados para diferentes medios de transporte público masivo:

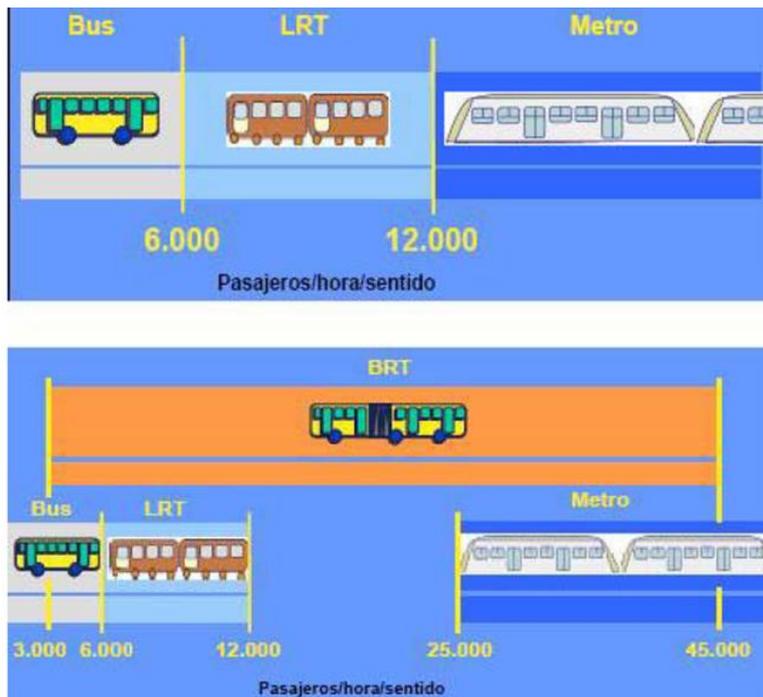


Figura 4.1: Pasajeros por hora y por sentido para diferentes medios de transporte[25]

Se desprende de la Figura 4.1 que el medio de transporte con más amplio rango de aplicación es el BRT. Es por ello, y por su bajo costo de infraestructura respecto al LRT, que este sistema ha adquirido un gran auge en los últimos años en países de América Latina. La siguiente Tabla muestra una comparación económica de los costos de inversión, operación y del material rodante entre el sistema BRT y LRT:

	BRT - Autobuses	LRT - Trenes Ligeros
MR	\$80 - \$400 mil	\$1.8 - \$2.4 M
Infraestructura	\$1-\$5 mill/km	\$10-\$15 mill/km
Operación(*)	\$6.75 mill/año	\$7.2 mill/año

(*) Sobre la base de una comparación real sobre el mismo eje

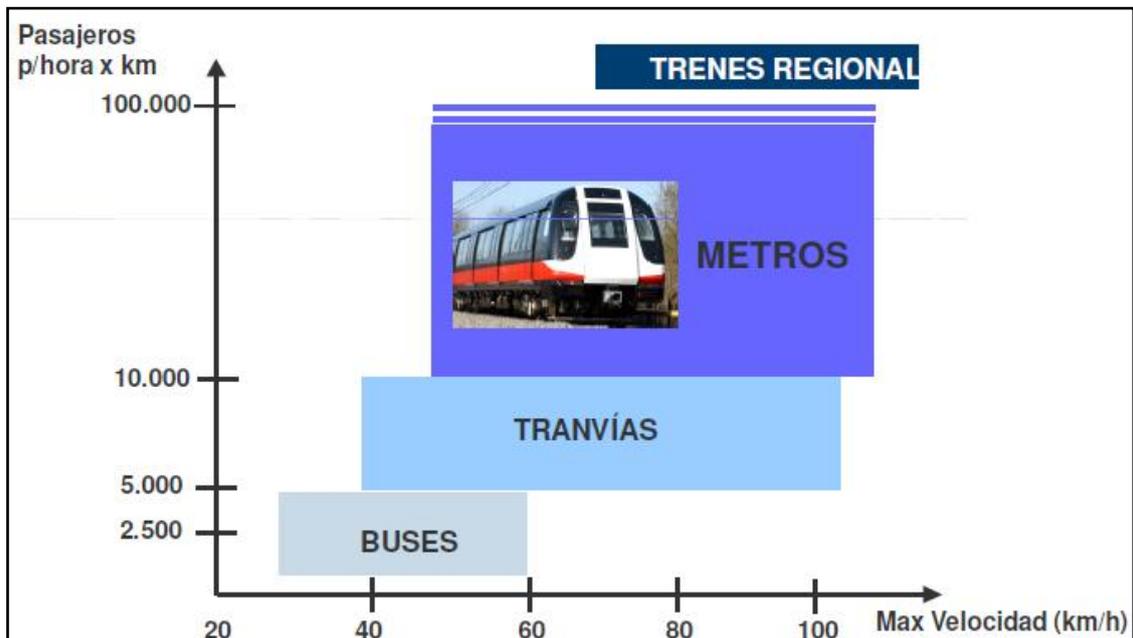
Tabla 4.1: Costos de implementación – BRT y LRT[14]

Los costos mostrados en la Tabla 4.1 son basados en la experiencia en América Latina en BRT y en Europa en LRT. A la fecha de publicación de este estudio no existía ningún LRT con tecnología moderna en países en desarrollo. A su vez, según datos obtenidos, en el corredor Garzón donde actualmente se está construyendo un sistema

BRT el km de obra costó aproximadamente U\$S4.000.000, mientras que una cotización estimativa del tranvía (incluyendo saneamiento, veredas, alumbrado, etc.) cuesta entre U\$S15.000.000 y U\$S25.000.000.[25]

El sistema BRT consiste en vías de bus físicamente segregadas del resto del tránsito, lo que permite una alta velocidad comercial de los buses troncales. Las ciudades que han adoptado este sistema han racionalizado el sistema de transporte antes existente, pasando de forma gradual a un sistema con líneas troncales, alimentadoras y transversales. Además, este sistema se complementa con terminales en las cabeceras de las líneas troncales e intercambiadores en puntos intermedios.

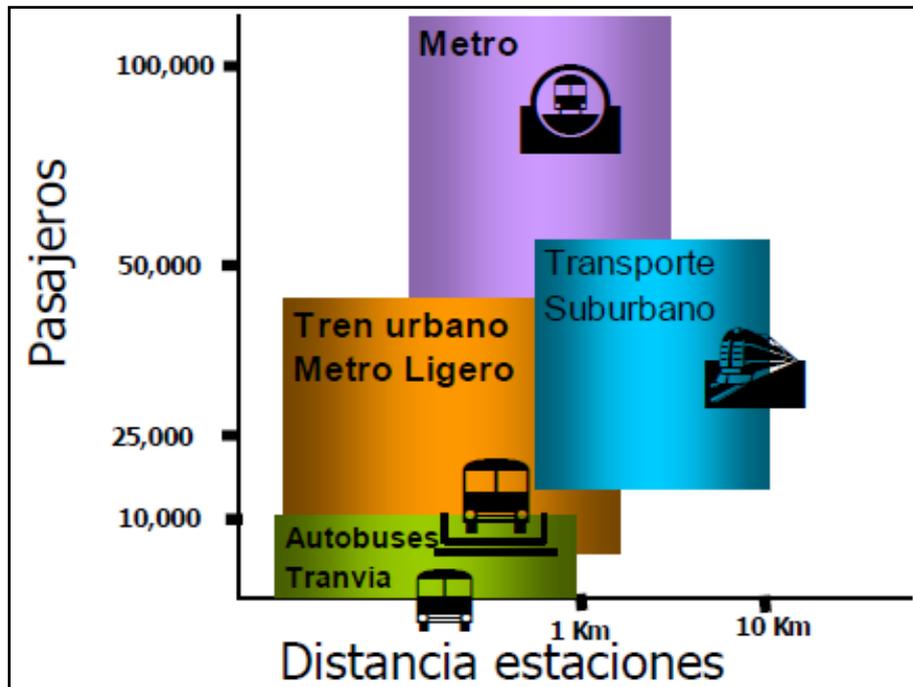
En la Gráfica 4.1 se pueden apreciar las posibles velocidades de operación para diferentes medio de transporte de pasajeros, mientras que en la Gráfica 4.2 se muestra la cantidad de pasajeros que se pueden desplazar por unidad de tiempo y dirección en una distancia media entre estaciones:



Gráfica 4.1: Velocidades de operación según el medio de transporte[49]

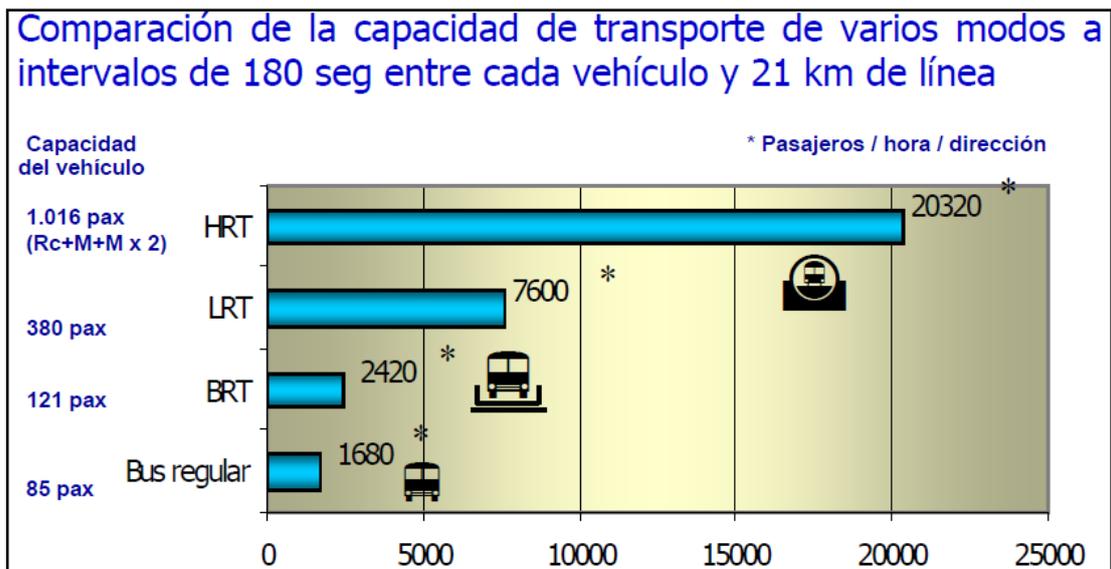
Vale la pena destacar que, según la ACAU (Asociación del Comercio Automotor del Uruguay), actualmente la velocidad promedio registrada en el centro de la ciudad es de 6 a 8km/h, siendo 6km/h la velocidad de una persona caminando.

[31]



Gráfica 4.2: Cantidad de pasajeros para diferentes medios de transporte[84]

En la Gráfica 4.3 se compara la capacidad de transporte de varios modos a intervalos de 180 segundos entre cada vehículo y 21km de línea, explicitando la capacidad de transporte del material rodante.



Gráfica 4.3: Comparación de la capacidad de transporte de varios modos a intervalos de 180s entre cada vehículo y 21km de línea [84]

4.3. Impacto ambiental

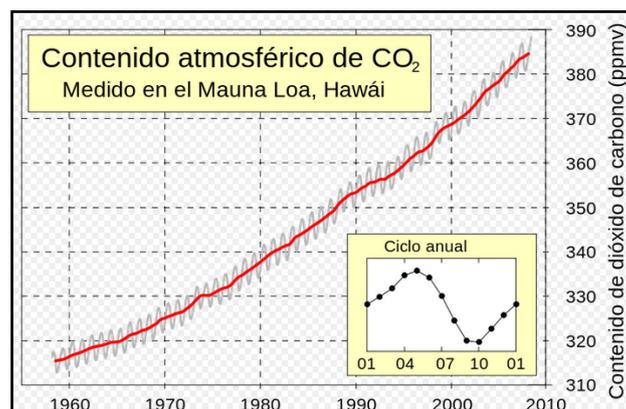
De acuerdo con la mayoría de la comunidad científica, el efecto invernadero se está viendo acentuado en la Tierra por la emisión de ciertos gases, como el dióxido de carbono y el metano, debido a la actividad humana, principalmente por la combustión de carbón, petróleo y gas natural que está liberando el carbono almacenado en estos combustibles fósiles y la deforestación de la selva pluvial que libera el carbono almacenado en los árboles. Por tanto es preciso diferenciar entre el efecto invernadero natural del originado por las actividades de los hombres (o antropogénico).

La población se ha multiplicado y la tecnología ha alcanzado una enorme y sofisticada producción de forma tal que se están presionando muchas partes del medio ambiente terrestre, siendo la Atmósfera la zona más vulnerable de todas por su delgadez. Dado el reducido espesor atmosférico, la alteración de algunos componentes moleculares básicos que también se encuentran en pequeña proporción supone un cambio significativo. En concreto, **la variación de la concentración de CO₂, el más importante de los gases invernadero de la atmósfera.**

Los gases invernaderos permanecen activos en la atmósfera mucho tiempo, por eso se les denomina de larga permanencia. Eso significa que los gases que se emiten hoy permanecerán durante muchas generaciones produciendo el efecto invernadero. Así, del CO₂ emitido a la atmósfera: el 50% tardará 30 años en desaparecer, un 30% permanecerá varios siglos y el 20% restante durará varios millares de años.

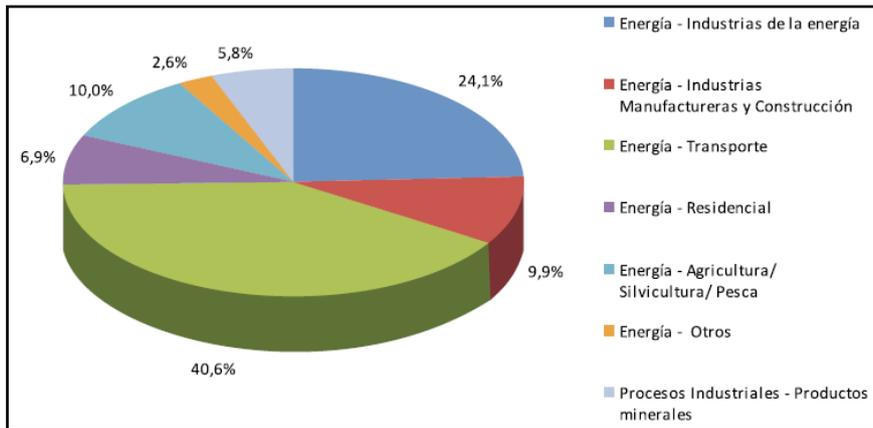
La concentración de CO₂ atmosférico se ha incrementado desde la época preindustrial (año 1750) desde un valor de 280 ppm a 379 ppm en 2005. Se estima que 2/3 de las emisiones procedían de la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), mientras que 1/3 procede del cambio en la utilización del suelo (incluida la deforestación). Del total emitido, solo el 45% permanece en la atmósfera, el 30% es absorbido por los océanos y el restante 25% pasa a la biósfera terrestre. Por lo tanto, no solo la atmósfera está aumentando su concentración de CO₂, también está ocurriendo en los océanos y en la biósfera.

La denominada curva Keeling muestra el continuo crecimiento de CO₂ en la atmósfera desde 1958. Recoge las mediciones de Keeling en el observatorio del volcán Mauna Loa. Estas mediciones fueron la primera evidencia significativa del rápido aumento de CO₂ en la atmósfera y atrajo la atención mundial sobre el impacto de las emisiones de los gases invernadero. (Wikipedia. Recuperado en Octubre de 2012, de http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero)

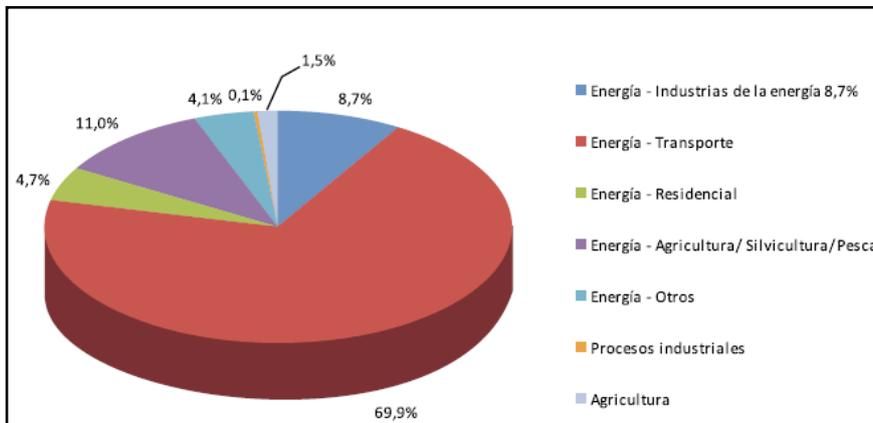


Gráfica 4.4: Contenido atmosférico de CO₂ en el volcán Mauna Loa[103]

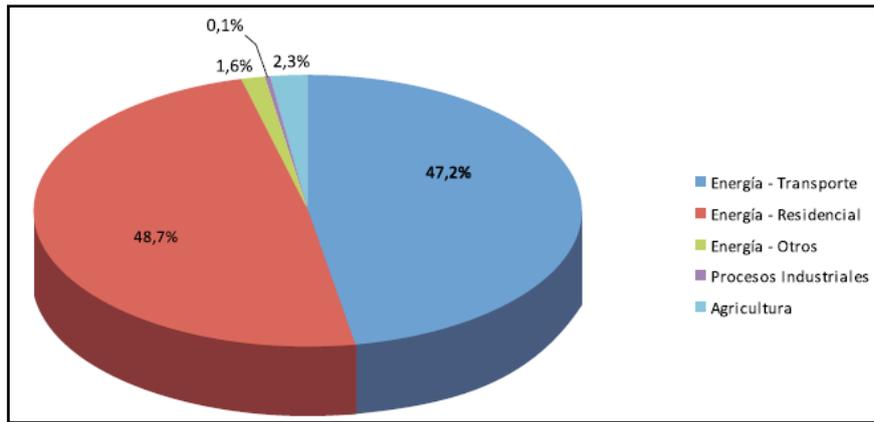
En lo que respecta a Uruguay, el 40,6% de las emisiones de CO₂, el 69,9% de las emisiones de NO_x, el 47,2% de las emisiones de CO, el 52,7% de las emisiones de COVDM (Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos al Metano) y el 17,2% de las emisiones de SO₂ se deben al sector transporte, tal como muestran las Gráficas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 respectivamente.[58]



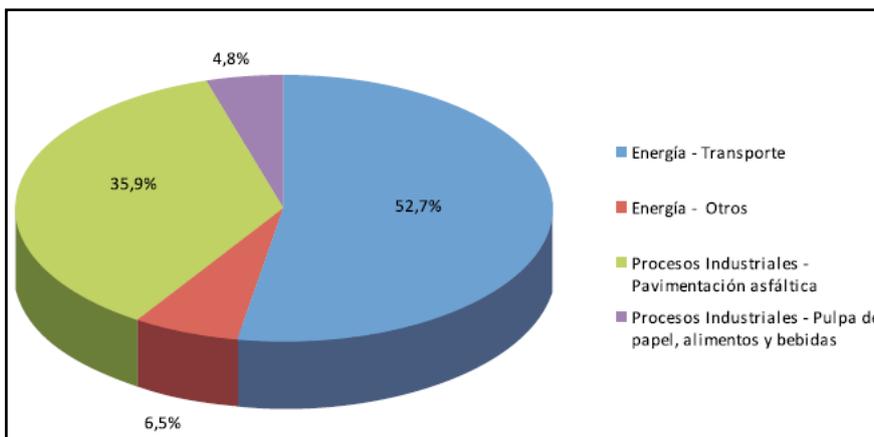
Gráfica 4.5: Emisiones de CO₂ en 2004 por sector y subsector[58]



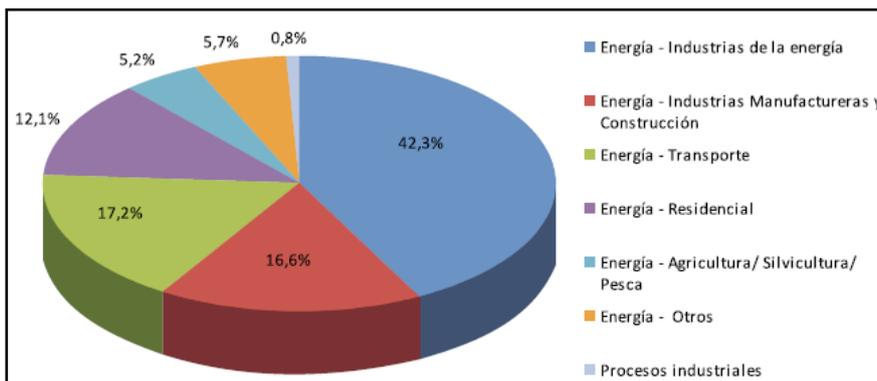
Gráfica 4.6: Emisiones de NO_x en 2004 por sector y subsector[58]



Gráfica 4.7: Emisiones de CO en 2004 por sector y subsector[58]

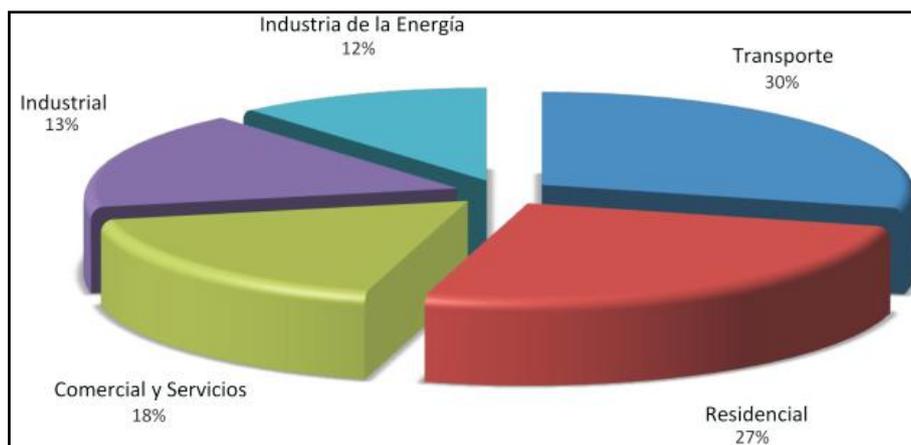


Gráfica 4.8: Emisiones de COVDM en 2004 por sector y subsector[58]



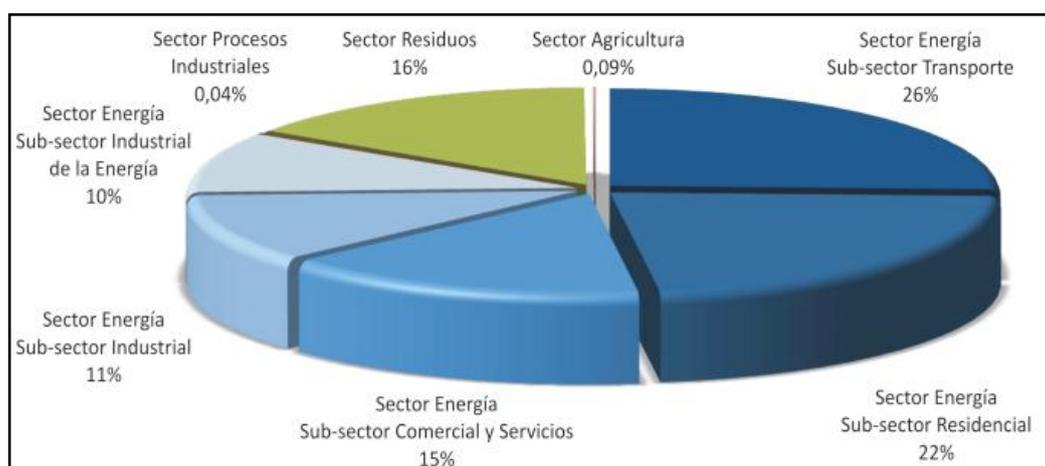
Gráfica 4.9: Emisiones de SO₂ en 2004 por sector y subsector[58]

En Montevideo, el sector energía es el responsable de la emisión de 3800 kilotoneladas de CO₂ equivalentes, estando el 30% de las emisiones asociadas al subsector transporte.



Gráfica 4.10: Perfil de las emisiones de CO₂ en 2006 del sector energía en el departamento de Montevideo[59]

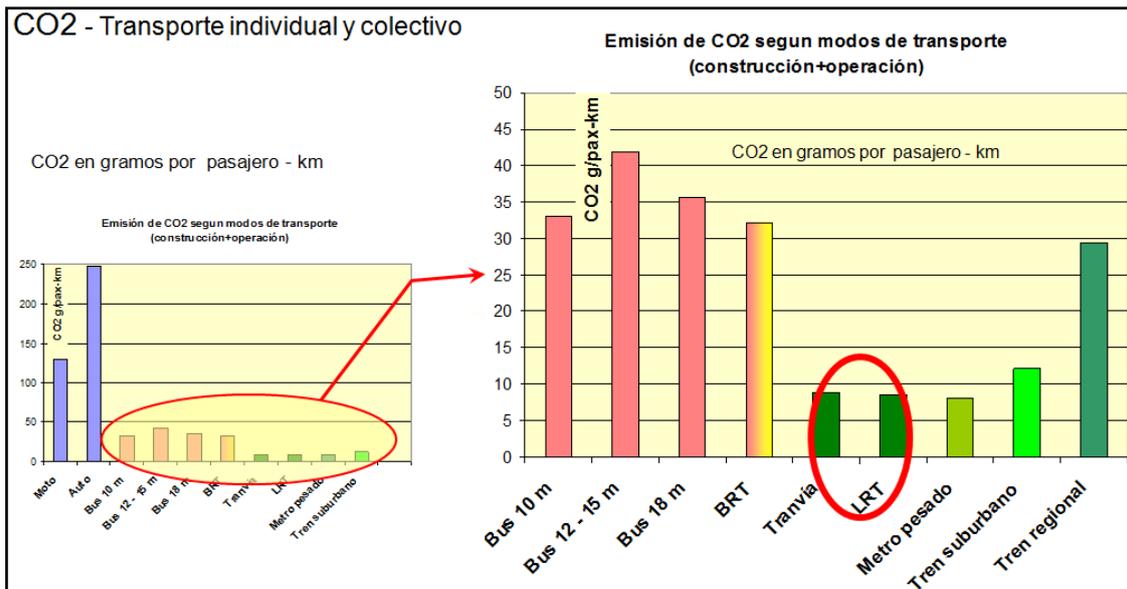
A su vez, el 26% de las emisiones de gases de efecto invernadero del departamento de Montevideo corresponden al subsector transporte, tal como se presenta en la Gráfica 4.11:



Gráfica 4.11: Perfil de las emisiones de GEI en 2006 en el departamento de Montevideo[59]

Por lo tanto, resulta fundamental mitigar las emisiones de CO₂, así como también del resto de los gases que contribuyen al efecto invernadero.

La Gráfica 4.12 muestra las emisiones de CO₂ de los principales medios de transporte en la construcción y operación de los mismos.



Gráfica 4.12: Emisiones de CO2 de los principales medios de transporte en construcción y operación[16]

Resulta evidente que el tranvía, el sistema LRT y el metro son los que emiten menos CO₂, mientras que el automóvil es el responsable de la mayor emisión del mismo. Si a esto se le suma que tanto el tranvía, el sistema LRT y el metro no consumen oxígeno (en operación), se concluye que cualquiera de ellos es una excelente opción para asegurar la no contaminación del aire.

Otra de las ventajas del tranvía es su baja contaminación acústica. Un tranvía es 4 veces menos ruidoso que el tráfico automovilístico. En particular, el nivel sonoro a bordo del tranvía utilizado en este proyecto es de 68dB a una velocidad media de 40km/h. La Tabla 4.2 compara algunos sonidos comunes y muestra cómo se clasifican desde el punto de vista del daño potencial para la audición en decibeles (dB). El ruido comienza a dañar la audición a niveles de alrededor de 70dB. Se observa que el tránsito urbano presenta aproximadamente un nivel sonoro de 90dB, lo que implica un efecto muy molesto para el oído humano.[33]

También cabe destacar que la preocupación por el nivel de la contaminación sonora en Montevideo debería ser mayor, más aún si tenemos en cuenta el crecimiento del parque automotor en los últimos años, el cual se presenta en la Tabla 4.3.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Living Dormitorio Oficina tranquila	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Tabla 4.2: Niveles sonoros y respuesta humana[33]

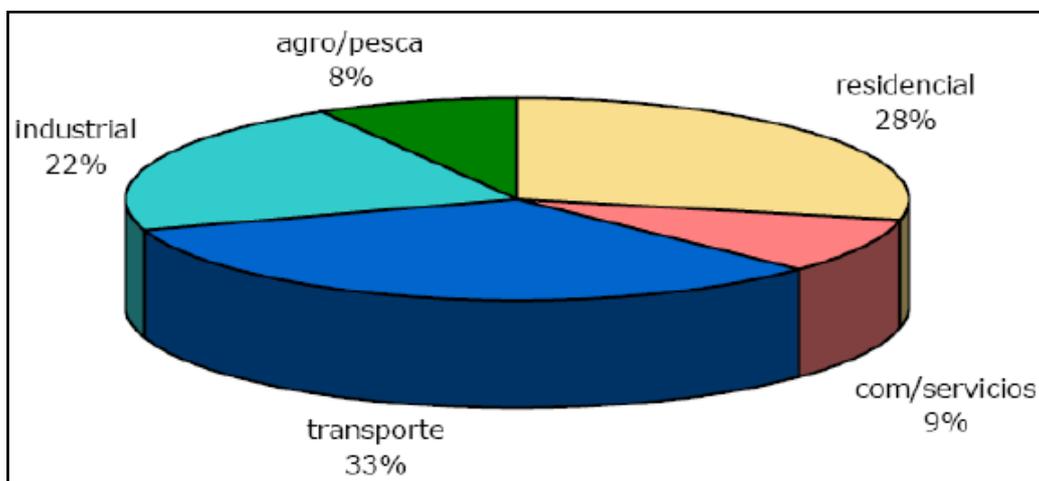
Tipo / Año	Empadronamientos en Montevideo										
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Sedan	141574	155301	152724	149951	149915	146642	140657	142639	143668	150475	159904
Camioneta	31196	35128	34256	33480	33881	33384	32641	34144	35394	38489	41532
Ómnibus	1031	2918	3093	3175	3238	3306	3379	3672	3957	4109	4486
Camión	17231	20019	20403	20155	20557	20944	21299	22353	23344	24897	26528
Motocicleta	26308	34953	38481	43238	52555	67621	86128	102892	115897	131699	147219
Maq. Vial	380	479	508	521	521	520	516	516	518	525	527
Total	217720	248798	249465	250520	260667	272417	284620	306216	322778	350194	380196

Tabla 4.3: Empadronamientos en Montevideo[43]

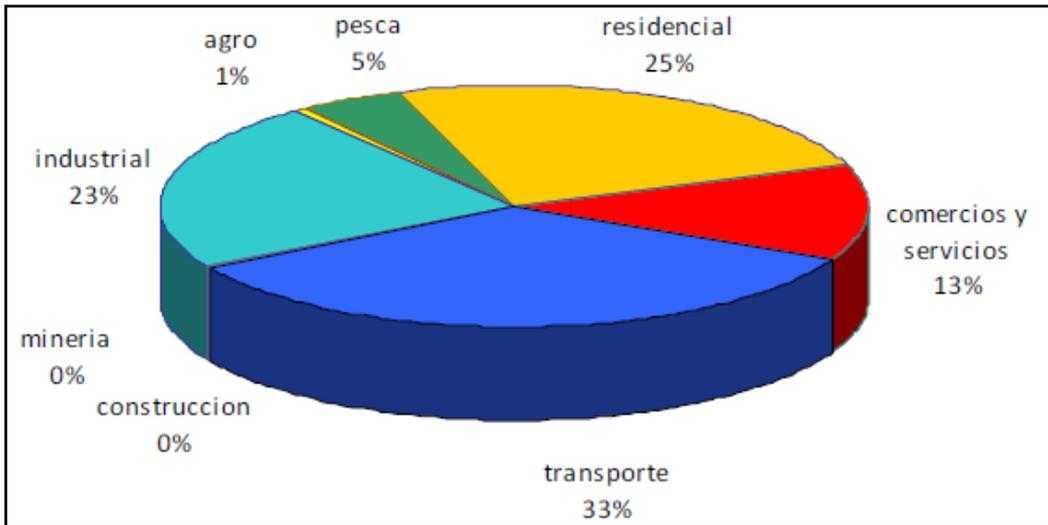
4.4. Consumo de energía

Debido al incremento de la demanda de energía que año a año se produce a nivel global, resulta de vital importancia que las ciudades desarrollen fuentes de energías limpias de forma de construir un sistema sustentable con el ambiente.

Según los resultados del análisis de situación efectuado como primera etapa del trabajo “Plan estratégico de energía para Montevideo” (PEDEM), se destaca el sector transporte como el responsable del mayor uso de energía en el departamento de Montevideo, así como también del país, con un 33% del consumo total del departamento. Estos resultados se aprecian en las Gráficas 4.13 y 4.14 respectivamente.

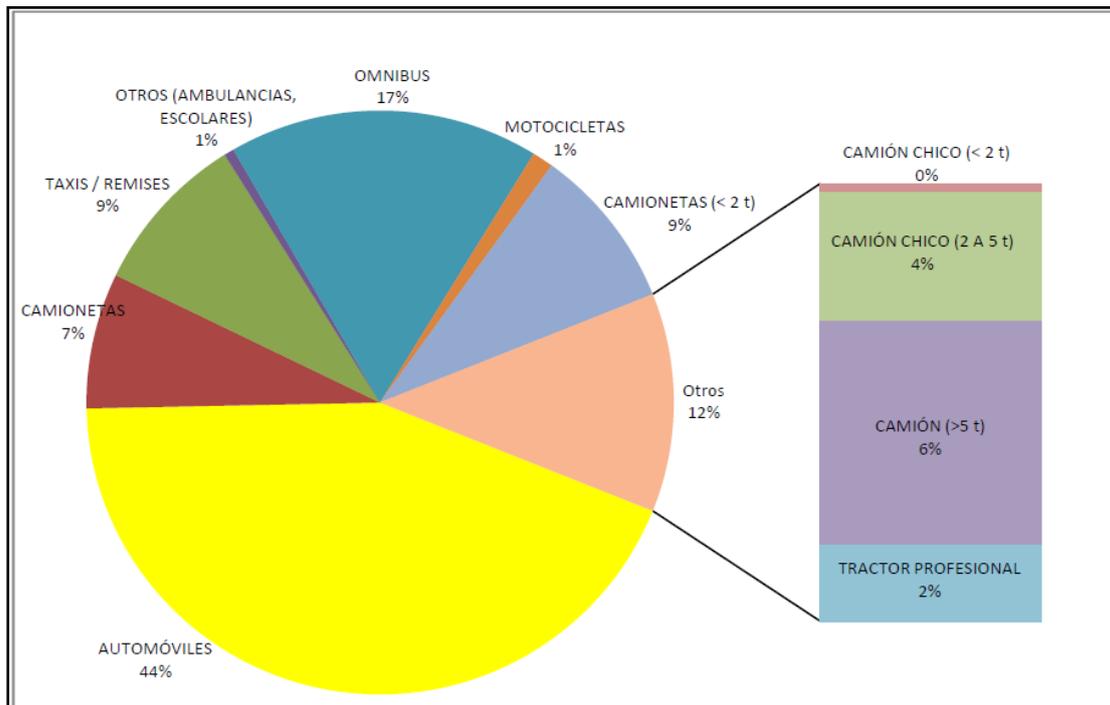


Gráfica 4.13: Consumo energético del país según sectores de la economía[27]



Gráfica 4.14: Consumo energético de Montevideo según sectores de la economía[27]

En la Gráfica 4.15 se presentan los resultados de las estimaciones primarias realizadas para el departamento de Montevideo, destacándose el consumo de los automóviles (44%) y el del transporte público (taxis y autobuses, 26%):



Gráfica 4.15: Consumo energético del sector transporte según el tipo de[27]

Dentro de las acciones priorizadas en dicho informe se encuentra el investigar tecnologías más eficientes para el transporte. Es por ello que, tomando como base los resultados del mismo, se calcula el ahorro energético del proyecto tranvía, así como

también las emisiones de CO₂ evitables si se sacara a los autobuses que actualmente circulan por el trayecto determinado para el tranvía.

Las Tablas 4.4 y 4.5 representan una cuantificación del estado de situación del sector transporte del PEDEM en unidades de medición y toneladas equivalentes de petróleo (*tep*). Las *tep* son unidades de energía que sirven también como parámetro de comparación de los niveles de emisión de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera que se generan al quemar diversos combustibles. Una *tep* equivale a la energía que rinde una tonelada de petróleo, con lo cual, como varía según la composición química de éste, se ha tomado un valor convencional de: 41.868.000.000J=11.630kWh.

TOTAL SECTOR TRANSPORTE – MONTEVIDEO						
Consumo de Energía Neta por fuentes y usos						
Año 2006 - en Unidades Físicas						
Tipo	Uso	Vehículo	GAS OIL (m ³)	NAFTA (m ³)	TURBO- COMBUSTIBLES (m ³)	NAFTA AVIACIÓN (m ³)
Carretero	Pasajeros	Automóviles	31.253	129.620	-	-
		Camionetas	22.187	3.449	-	-
		Taxis / remises	30.078	8	-	-
		Otros (ambulancias, escolares)	1.555	316	-	-
		Omnibus	57.321	224	-	-
	Cargas	Motocicletas	-	4.404	-	-
		Camionetas (< 2 t)	19.304	12.372	-	-
		Camión chico (< 2 t)	780	-	-	-
		Camión chico (2 a 5 t)	12.089	-	-	-
		Camión (>5 t)	20.769	-	-	-
Ferrocarril	Pasajeros	-	7.078	-	-	
	Cargas	-	1.147	-	-	
Marítimo / Fluvial	Pasajeros / Cargas	-	4.194	-	-	
	Aéreo	Pasajeros / Cargas	-	-	1.922	29
TOTAL			252.228	150.393	1.922	29

Tabla 4.4: Consumo total de energía en el sector transporte en unidades de medición[27]

TOTAL SECTOR TRANSPORTE - MONTEVIDEO
Consumo de Energía Neta por fuentes y usos
Año 2006 - en Tep (Toneladas equivalentes de petróleo)

Tipo	Uso	Vehículo	GAS OIL (Tep)	NAFTA (Tep)	TURBO- COMBUSTIBLES (Tep)	NAFTA AVIACIÓN (Tep)	TOTAL (tep)
Carretero	Pasajeros	Automóviles	27.053	100.067	-	-	127.120
		Camionetas	19.205	2.663	-	-	21.868
		Taxis / remises	26.035	6	-	-	26.042
		Otros (ambulancias, escolares)	1.346	244	-	-	1.590
		Omnibus	49.617	173	-	-	49.790
	Cargas	Motocicletas	-	3.400	-	-	3.400
		Camionetas (< 2 t)	16.710	9.551	-	-	26.261
		Camión chico (< 2 t)	675	-	-	-	675
		Camión chico (2 a 5 t)	10.465	-	-	-	10.465
		Camión (>5 t)	17.977	-	-	-	17.977
Ferrocarril	Pasajeros	-	6.127	-	-	6.127	
	Cargas	-	993	-	-	993	
Marítimo / Fluvial	Pasajeros / Cargas	-	3.630	-	-	3.630	
	Aéreo	Pasajeros / Cargas	-	-	1.600	2.200	3.800
TOTAL			218.328	116.103	1.600	2.200	338.232

Tabla 4.5: Consumo total de energía en el sector transporte en *tep*. [27]

Como los datos del informe PEDEM son de un año (2006), para poder comparar se calcula el consumo eléctrico del tranvía durante un año mediante ciertas hipótesis:

- Se asumen válidos los datos del PEDEM (2006) para el año 2012

- Como se dispone de la información de la venta de boletos diaria total en Montevideo en el mes de Marzo de 2012, la venta de boletos en las paradas del trayecto del tranvía para el día Jueves 8 de Marzo de 2012 (al que se lo llamará “día de referencia”) y como se conoce la energía que consume cada unidad de tranvía, se calcula primero la energía consumida por el tranvía en el día de referencia y luego, por medio de unos factores C_i , se modela el consumo total de la semana.

La Tabla 4.6 muestra el consumo de energía del tranvía para el día de referencia. Para hallar los factores C_i , se asume que el porcentaje de venta de boletos de todo Montevideo es proporcional al porcentaje de venta de boletos en las paradas del trayecto del tranvía en los 7 días de la semana. Para ello, primero se promedian los mismos días de Marzo (es decir, se promedian todos los lunes, todos los martes, etc.) asumiendo similitud de valor entre los mismos. Finalmente, se determinan las relaciones C_i de la venta de boletos (o flujo de pasajeros) de los 7 días de la semana como el valor del flujo de pasajeros de cada día de la semana respecto al valor del flujo de pasajeros el día de referencia.

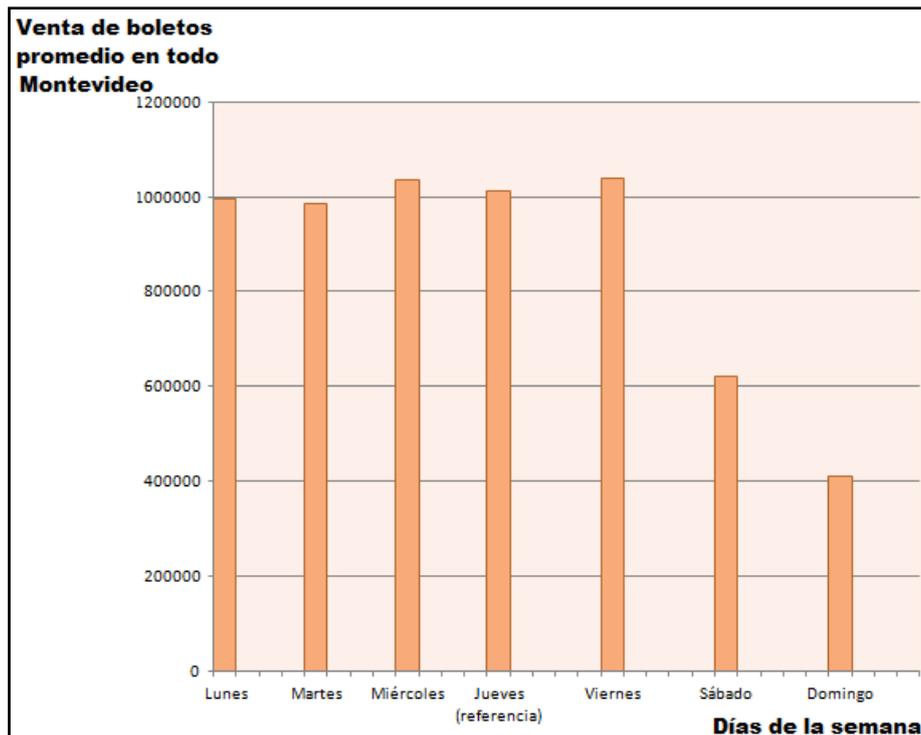
Hora	Cantidad de pasajeros	Nº de tranvías necesarios	Frecuencia de paso (min)	Energía consumida por tranvía el día 08/03/12 (kWh)
00:00 - 01:00	776	2	14,0	1090
01:00 - 02:00	327	1	28,0	545
02:00 - 03:00	243	1	28,0	545
03:00 - 04:00	84	1	28,0	545
04:00 - 05:00	127	1	28,0	545
05:00 - 06:00	663	2	14,0	1090
06:00 - 07:00	1530	3	9,3	1635
07:00 - 08:00	3099	5	5,6	2725
08:00 - 09:00	5013	8	3,5	4360
09:00 - 10:00	5607	9	3,1	4905
10:00 - 11:00	6270	10	2,8	5450
11:00 - 12:00	9253	15	1,9	8175
12:00 - 13:00	9924	16	1,8	8720
13:00 - 14:00	9949	16	1,8	8720
14:00 - 15:00	10478	17	1,6	9265
15:00 - 16:00	11683	19	1,5	10355
16:00 - 17:00	12307	20	1,4	10900
17:00 - 18:00	13156	21	1,3	11445
18:00 - 19:00	13162	21	1,3	11445
19:00 - 20:00	9755	16	1,8	8720
20:00 - 21:00	5912	10	2,8	5450
21:00 - 22:00	3815	6	4,7	3270
22:00 - 23:00	2597	5	5,6	2725
23:00 - 00:00	1696	3	9,3	1635
			TOTAL	124260

Tabla 4.6: Energía consumida por el tranvía el día 8 de Marzo de 2012 (Elaboración propia a partir de datos suministrados)

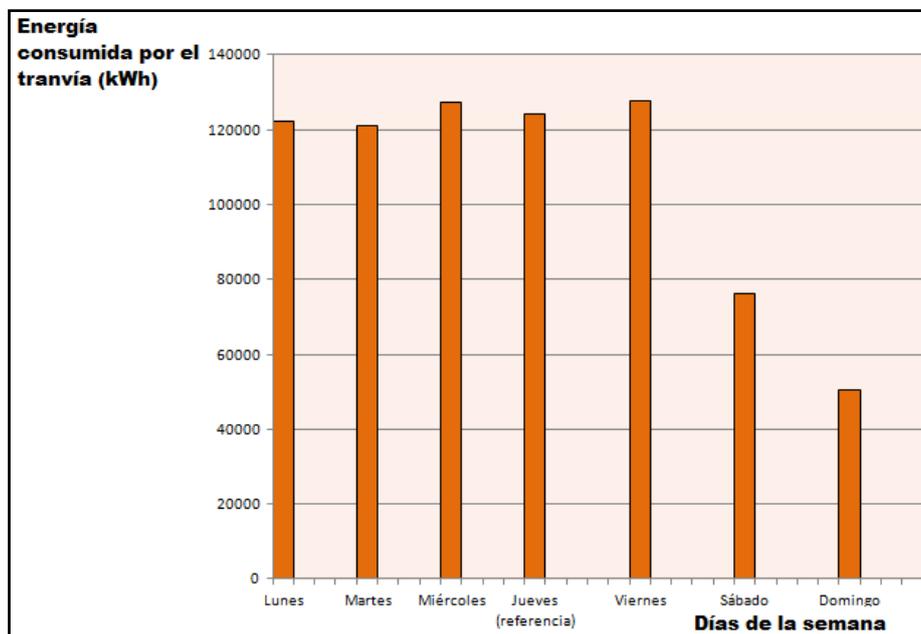
Se observa que el consumo para el día de referencia es de 124.260kWh. En la Tabla 4.7 se muestra la venta de boletos en Montevideo en el mes de Marzo de 2012, así como también el cálculo de la energía consumida por el tranvía para una semana típica de operación:

Fecha	Pasajeros Aceptados	Promedio Pasajeros	Día	Ci=Día/referencia	Energía consumida por tranvía(kWh)
lun 19	1042516	994314,25	Lunes	0,983180128	122169,9627
lun 26	1004454				
lun 12	975120				
lun 05	955167				
mar-13	1058705	985761,5	Martes	0,97472315	121119,0986
mar-20	1027653				
mar-27	968557				
mar-06	888131				
mié 21	1072489	1036089,75	Miércoles	1,024487835	127302,8584
mié 14	1041744				
mié 07	1021598				
mié 28	1008528				
jue 08	1018338	1011324,6	Jueves (referencia)	1	124260
jue 15	1066260				
jue 01	901975				
jue 29	1041687				
jue 22	1028363				
vie 30	1089841	1039722,2	Viernes	1,02807961	127749,1723
vie 23	1076854				
vie 09	1046141				
vie 02	963158				
vie 16	1022617	621508	Sábado	0,614548484	76363,79465
sáb 24	635637				
sáb 17	626713				
sáb 10	624045				
sáb 31	620302				
sáb 03	600843	411620,5	Domingo	0,40701126	50575,2192
dom 11	426069				
dom 18	413999				
dom 04	407986				
dom 25	398428				
				Total	749540,1059

Tabla 4.7: Energía consumida por el tranvía en una semana (Elaboración propia a partir de datos suministrados)



Gráfica 4.16: Venta de boletos por semana promedio en Montevideo(Elaboración propia a partir de datos suministrados)



Gráfica 4.17: Energía consumida por semana por el tranvía(Elaboración propia a partir de datos suministrados)

Por último, se asume que en todas las semanas del año se consume aproximadamente la misma energía de forma de poder calcular la energía consumida anualmente. Para ello, se calcula el número de semanas de que tiene un año:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ semana} \quad \text{-----} \quad 7 \text{ días} \\ x \text{ semanas} \quad \text{-----} \quad 365 \text{ días} \end{array}$$

$$x = (365/7) \times 1 = \underline{\underline{52,14285714 \text{ semanas}}}$$

Luego, la energía consumida por el tranvía en un año es igual a:

Energía tranvía 1 año	=	Energía tranvía 1 semana	x (n° de semanas)	=	749.540,1059	x	52,14285714	=	<u><u>39.083.162,66 kWh</u></u>
-----------------------------	---	--------------------------------	-------------------	---	--------------	---	-------------	---	---------------------------------

Finalmente, considerando que una *tepson* 11.630kWh, se tiene que el tranvía consume anualmente:

Energía tranvía 1 año (tep)	=	Energía tranvía 1 año (kWh)	=	<u><u>39.083.162,66</u></u>	=	<u><u>3360,55 tep</u></u>
		<u>11630</u>		11630		

Si se observa la Tabla 4.5, se tiene que la cantidad de *tep* que consumen los autobuses de Montevideo es de 49.790, por lo que el consumo del tranvía representaría el 6,74% del consumo total de los autobuses. Además, considerando que los autobuses que dejarían de circular con la introducción del tranvía funcionan a gasoil, y sabiendo que 1 *tep* equivale a la emisión de 2,9 toneladas de CO₂, de introducirse el tranvía se **estaría evitando la emisión anual aproximada de 2,9·3360,55= 9745,6 toneladas de CO₂.**

Se debe destacar que el porcentaje de 6,74% seguramente sea mayor debido a que en el estudio de la demanda de pasajeros no fue considerada la venta de boletos en las paradas aledañas a la Avenida 18 de Julio (por ejemplo, las paradas en la calle Colonia). Si a esto se le agrega el número de automóviles y motos que, posiblemente luego de la introducción del tranvía y debido a sus ventajas los usuarios de los automóviles y motos prefieran hacer uso del mismo (ver Figura 4.2), **posiblemente este porcentaje ronde el 10%.**

También merece un destaque el hecho de que un sistema de transporte eléctrico debe ser acompañado por una mayor diversificación de la matriz energética, en particular, aumentando la cantidad de fuentes de energías limpias como la eólica o la solar (desde el punto de vista de las emisiones, de nada sirve implementar un sistema de transporte eléctrico si a fin de cuentas se emite CO₂ en la generación de electricidad para alimentar el mismo).

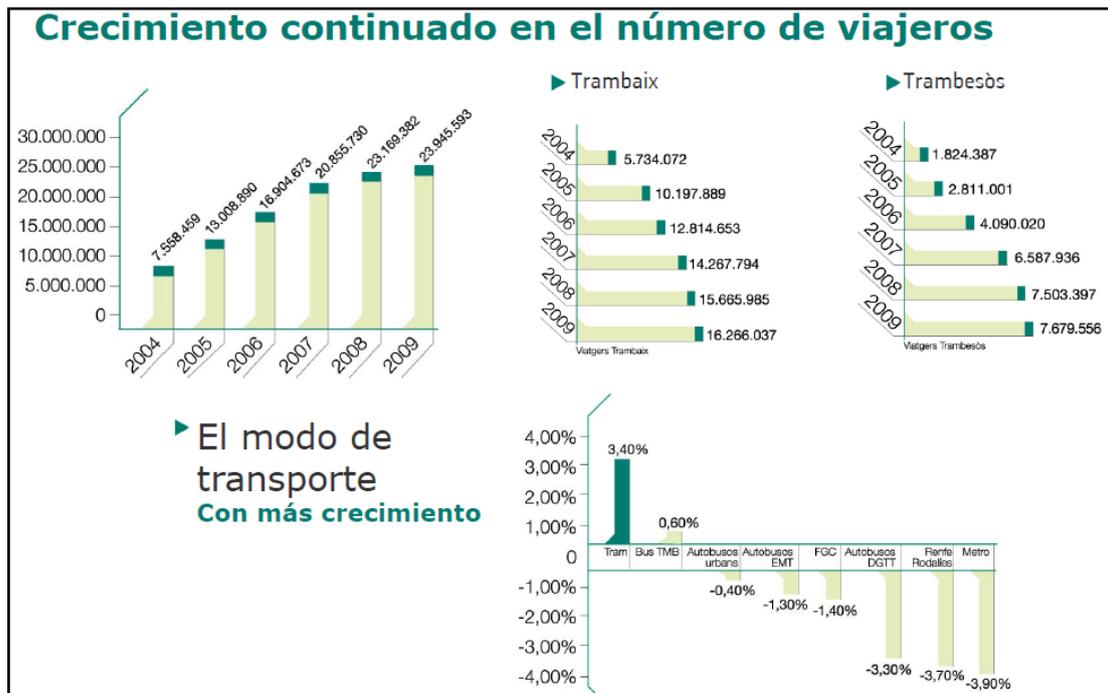


Figura 4.2: Estadísticas del crecimiento de pasajeros en el tranvía de Barcelona[35]

Por último, y siguiendo con la comparación de consumo del tranvía respecto a otros medios, en la Figura 4.3 se presenta la comparación del consumo de energía del tranvía, el autobús y el automóvil para trasladar 218 personas:

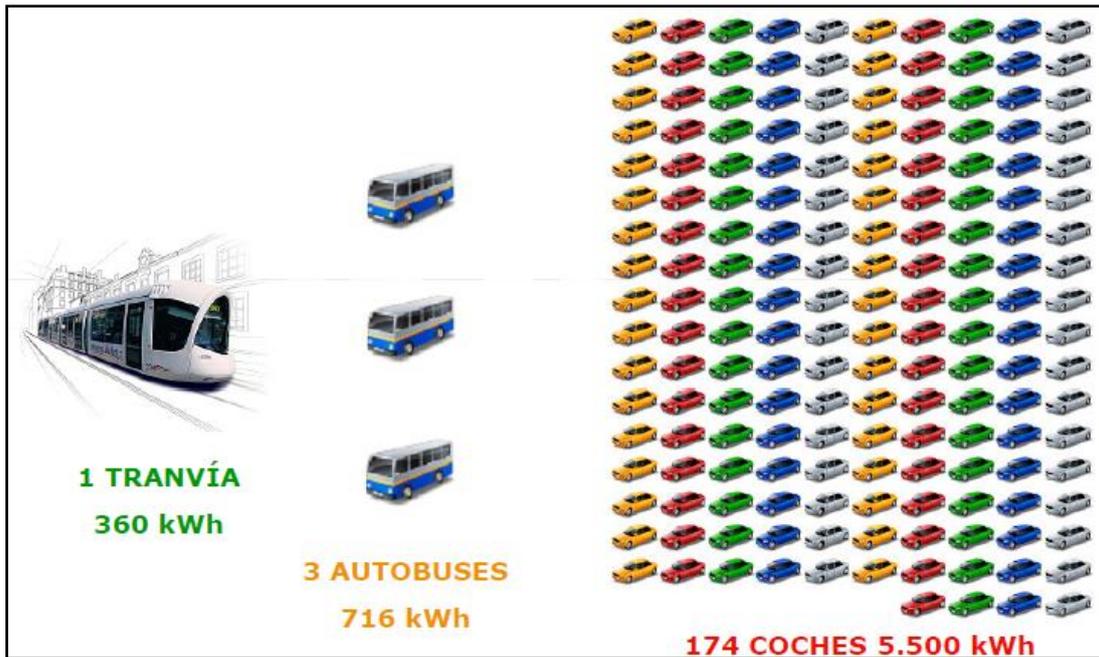


Figura 4.3: Consumo de energía del tranvía, el autobús y el automóvil para trasladar 218 personas[49]

Se deduce que en el transporte de las mismas, mientras un tranvía consume aproximadamente 1,65kWh/persona, los autobuses consumen 3,28kWh/persona y el coche 25,23kWh/persona.

4.5. Aprovechamiento del espacio urbano

Existen varios estudios que prueban que el transporte individual desaprovecha el espacio urbano mientras que el colectivo optimiza el mismo. A modo de ejemplo, en la Tabla 4.8 se muestra el espacio urbano requerido por diferentes medios de transporte para trasladar 15.000 personas:

Automóvil	2.000.000 m2
Autobús	35.000 m2
Tranvía moderno	15.000 m2

Tabla 4.8: Espacio urbano requerido para trasladar 15.000 personas[49]

Asimismo, el ancho de vía requerido por diferentes medios de transporte para trasladar 50.000 personas por hora/sentido se representa en la Figura 4.4:

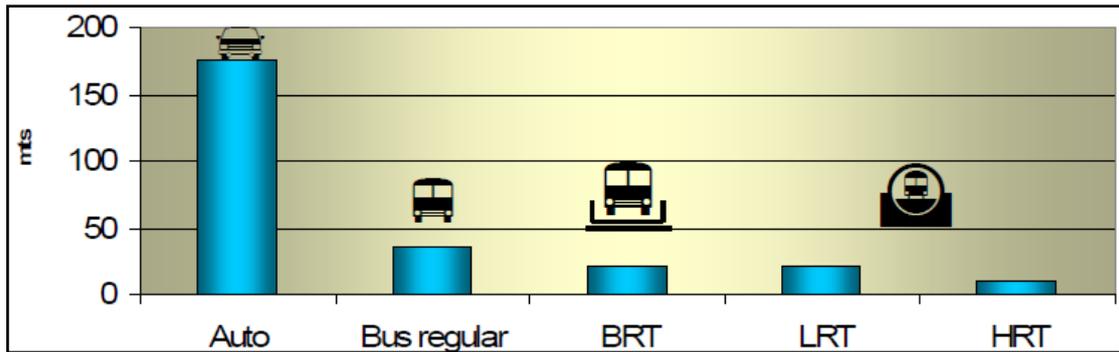


Figura 4.4: Ancho de vía requerido según el medio de transporte[84]

En la Figura 4.5 se presenta el número de personas que atraviesan un espacio de entre 3 y 5m de amplitud en un entorno urbano durante un periodo de 1 hora y en la Figura 4.6 se muestra una comparación entre varios medios de transporte.

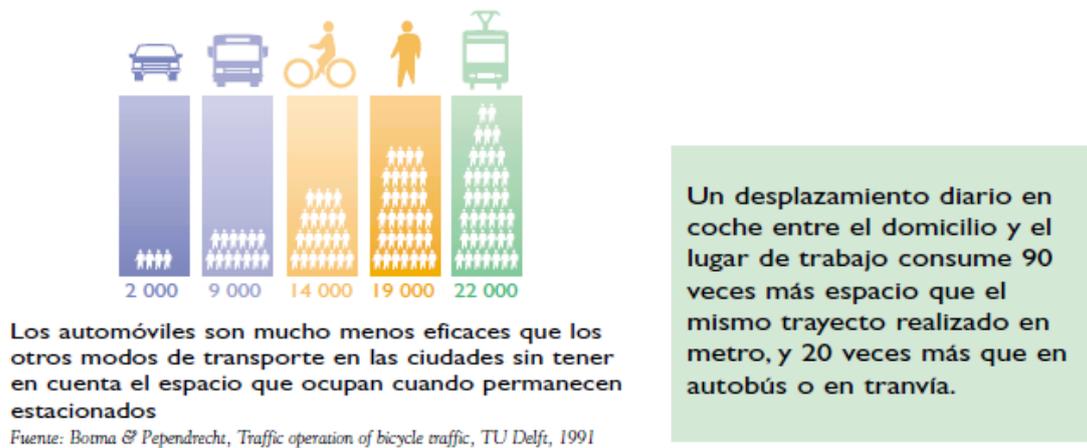


Figura 4.5: Número de personas que atraviesan un espacio de entre 3 y 5m durante 1 hora[90]

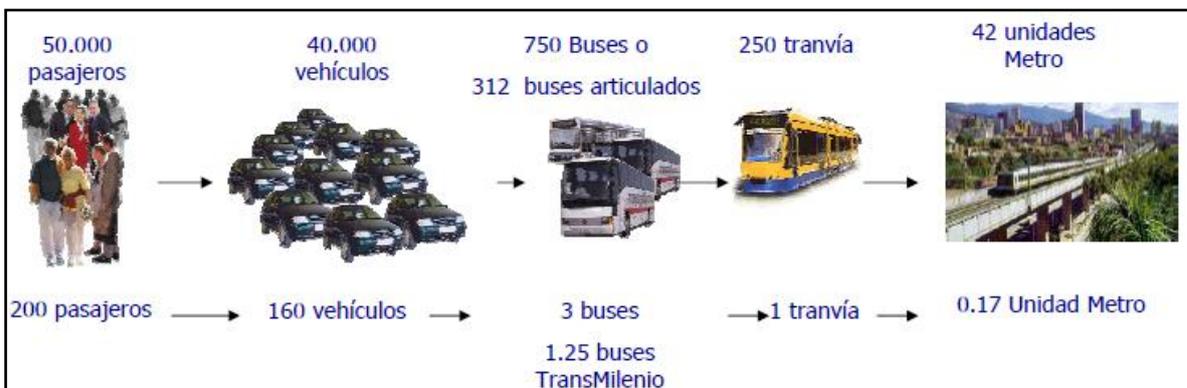


Figura 4.6: Capacidad de varios medios de transporte[84]

En particular, el tranvía utilizado en este proyecto tiene las dimensiones mostradas en la Figura 4.7:

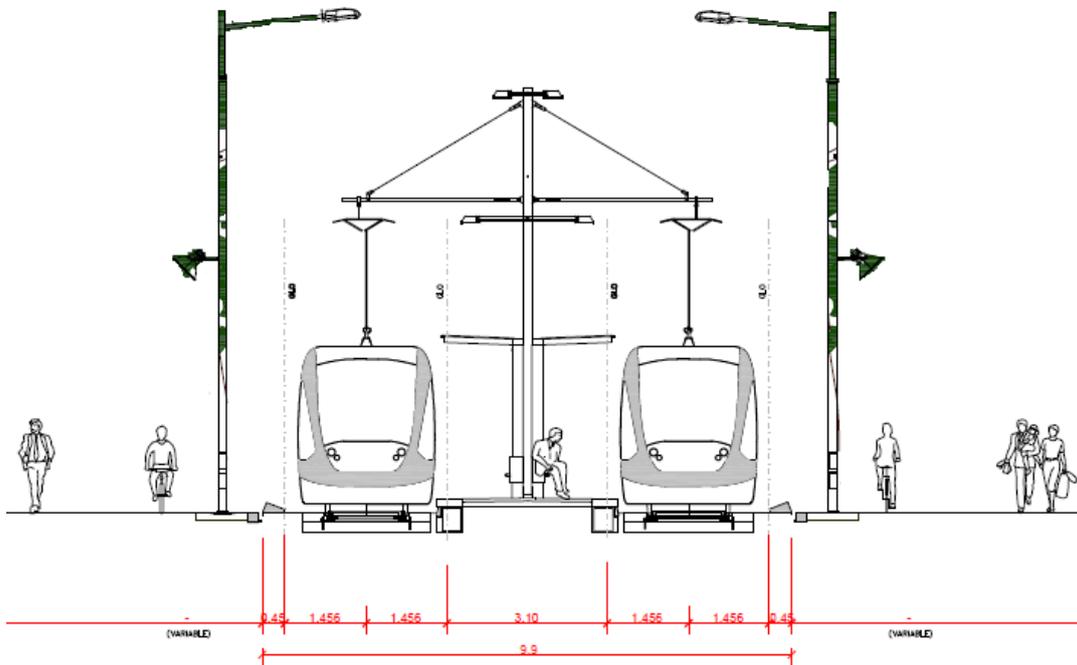


Figura 4.7: Secciones tranviarias[10]

Otra de las ventajas del tranvía es que se puede adaptar a varios tipos de suelos, tal como se puede apreciar en la Figura 4.8:



Figura 4.8: Diferentes tipos de suelo donde funciona el tranvía[16]

4.6. Seguridad

Si bien en las condiciones actuales es difícil mensurar el costo total de los accidentes de tránsito ya que no todos los organismos tienen este ítem incorporado a sus cuentas, se estima que en Uruguay se gastan U\$S1.000.000.000 al año en accidentes de tránsito^(*). Esta gran cifra, la cual es insignificante frente al valor de la vida humana, nos

hace pensar que un medio de transporte tan seguro como el tranvía (ver Figura 4.9) debería ser tenido en cuenta en la planificación del sistema de transporte sobre las principales arterias de Montevideo.

(*) (IM. 2012, p.1)

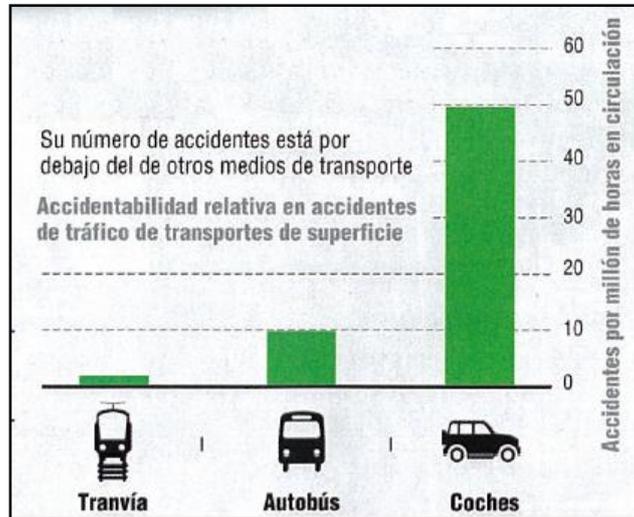


Figura 4.9: Accidentes de tránsito según el medio de transporte[30]

En las Tablas 4.9, 4.10 y 4.11 se presenta la evolución de los accidentes de tránsito en el departamento de Montevideo, en jurisdicción de la Intendencia de Montevideo y en jurisdicción Nacional respectivamente dentro del departamento de Montevideo entre los años 2006 y 2011 según la gravedad de los mismos:

Año	Accidentes según gravedad			
	Fatal	Grave	Leve	Total
2006	103	856	6218	7177
2007	131	984	6759	7874
2008	123	1044	6903	8070
2009	122	991	6970	8083
2010	135	1147	7411	8693
2011	141	1100	7226	8435

Tabla 4.9: Evolución de accidentes de tránsito totales por año y gravedad en Montevideo[43]

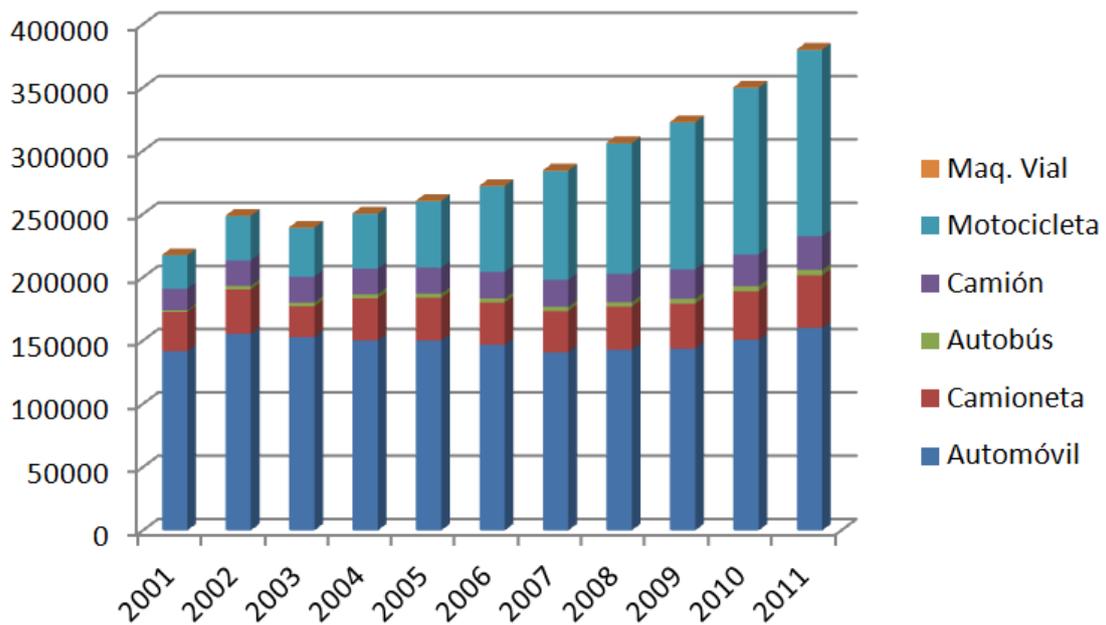
Año	Accidentes según gravedad			
	Fatal	Grave	Leve	Total
2006	94	839	6122	7055
2007	121	953	6639	7713
2008	114	1018	6775	7907
2009	112	960	6841	7913
2010	121	1090	7168	8379
2011	125	1063	7047	8203

Tabla 4.10: Evolución de accidentes de tránsito en jurisdicción de la Intendencia de Montevideo por año y gravedad[43]

Año	Total de accidentes según gravedad			
	Fatal	Grave	Leve	Total
2006	9	17	96	122
2007	10	31	120	161
2008	9	26	128	163
2009	10	31	129	170
2010	14	57	243	314
2011	16	37	179	232

Tabla 4.11: Evolución de accidentes de tránsito en jurisdicción Nacional dentro de Montevideo por año y gravedad[43]

Analizando las Tablas 4.9 a 4.11 se observa una clara tendencia creciente en el total de accidentes y, en particular, de los accidentes fatales. Una de las causas del aumento en la tasa de accidentalidad es el aumento en el parque automotor, en particular, de las motocicletas (ver Tabla 4.3 y Gráfica 4.18).



Gráfica 4.18: Empadronamientos en Montevideo desde 2001 hasta 2011[44]

Al reducir el volumen de tránsito en las vías, se reduce el número de accidentes. Por lo tanto, si se incorpora un sistema de tranvías por Avenida 18 de Julio, acompañado de mejoras de infraestructura que favorezcan el transporte activo (peatones, bicicletas) y reglamentaciones que desalienten el uso del auto particular, mejorará el tránsito por dicha avenida.

Capítulo 5: Tecnologías de Tracción

La tracción eléctrica cumple la función de transportar personas y/o bienes mediante la ayuda de líneas electrificadas de tracción. El objetivo del suministro de la energía de tracción es asegurar una operación segura, ininterrumpida y confiable del vehículo de tracción eléctrica.

Generalmente, el tipo de corriente es lo que se utiliza para distinguir entre los distintos tipos de suministro de energía eléctrica de tracción. En sus comienzos, el tranvía (y más aún, los sistemas de transporte eléctrico ferroviarios) eran alimentados con corriente continua. Esto se debía a la curva Par-Velocidad de los motores serie de continua utilizados en los vehículos de tracción eléctrica, que resultaba extremadamente favorable debido a la forma hiperbólica que la misma presenta. Globalmente, más de la mitad de los sistemas eléctricos de tracción utilizan este tipo de tecnología.

Sin embargo, los bajos valores de tensión utilizados son una desventaja para este tipo de tecnología, ya que para poder transmitir la energía de tracción son necesarias altas corrientes.

A comienzos del Siglo XX, se realizaron esfuerzos para combinar las ventajas que los motores series de continua presentan con la capacidad de transformación de la corriente alterna. En aquellos tiempos, el objetivo era un motor monofásico de corriente alterna, el cual se alimentaba de tensión alterna monofásica a la frecuencia de la red pública, siendo la misma en Europa de 50Hz. Debido al estado del desarrollo de la tecnología en aquella época, varios fueron los problemas que surgieron, como por ejemplo la interferencia que se producía en los cables tendidos en paralelo con el sistema eléctrico de tracción y los altos valores de asimetría que presentaba la tensión trifásica de la red pública causados por la alimentación monofásica a los sistemas de tracción eléctrica.

Estos problemas no pudieron ser resueltos satisfactoriamente en aquella época. En Alemania, esfuerzos volcados en el desarrollo de un nuevo sistema de alimentación arribaron a un sistema monofásico de corriente alterna que funcionaba a una frecuencia

de $50/3 = 16,7\text{Hz}$. Este nuevo sistema de alimentación de los vehículos de tracción eléctrica necesitaba de una red de distribución monofásica en alta tensión separada de la red pública. Este tipo de tecnología fue luego adoptada por Austria, Suiza, Noruega y Suecia, y ha demostrado ser particularmente poderosa y efectiva.

Debido al enorme progreso logrado desde entonces en el campo de la electrónica de potencia, sistemas de tracción AC 25kV 50Hz son los preferidos hoy en día en los países que están comenzando a electrificar sus redes ferroviarias o que están construyendo nuevas líneas de alta velocidad, en donde la alimentación en continua se ha usado en el pasado.

En la actualidad, se utilizan diversos tipos de tecnología de tracción mundialmente. Entre ellos, los más comunes son:

- DC 600V, 750V, 1500V y 3000V
- AC 16,7Hz 15kV
- AC 50Hz 25kV

En la Tabla 5.1 se presentan las tensiones nominales y los límites de operación de los diferentes tipos de alimentación de los sistemas eléctricos de tracción utilizados según la Norma EN 50163:

Tipos de alimentación	U_n (V)	$U_{min 2}$ (V)	$U_{min 1}$ (V)	$U_{max 1}$ (V)	$U_{max 2}$ (V)	$U_{max 3}$ (V)
DC 600V	600		400	720	800	
DC 750V	750		500	900	1000	1270
DC 1500V	1500		1000	1800	1950	2540
DC 3000V	3000		2000	3600	3900	5075
AC 15kV 16,7Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24300
AC 25kV 50Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38750

Tabla 5.1: Tensiones nominales y límites operacionales para sistemas ferroviarios eléctricos según la norma EN 50 163

U_n : Tensión nominal

$U_{min 1}$: Mínima tensión permanente

$U_{min 2}$: Mínima tensión no permanente - Máxima duración 2 minutos

$U_{max 1}$: Máxima tensión permanente

$U_{max 2}$: Máxima tensión no permanente - Máxima duración 5 minutos

$U_{max 3}$: Máxima sobretensión - Duración mayor a 20ms

En condiciones normales de funcionamiento, la tensión sobre el pantógrafo debe encontrarse entre $U_{min 1}$ y $U_{max 2}$, así como también la duración de las tensiones entre $U_{min 1}$ y $U_{min 2}$ no debe exceder los 2 minutos. Sumado a esto, la duración de las tensiones entre $U_{max 1}$ y $U_{max 2}$ no debe exceder los 5 minutos.

[51]

En la Figura 5.1 se aprecian las diferentes formas de generar la energía de tracción y su conexión con la red pública:

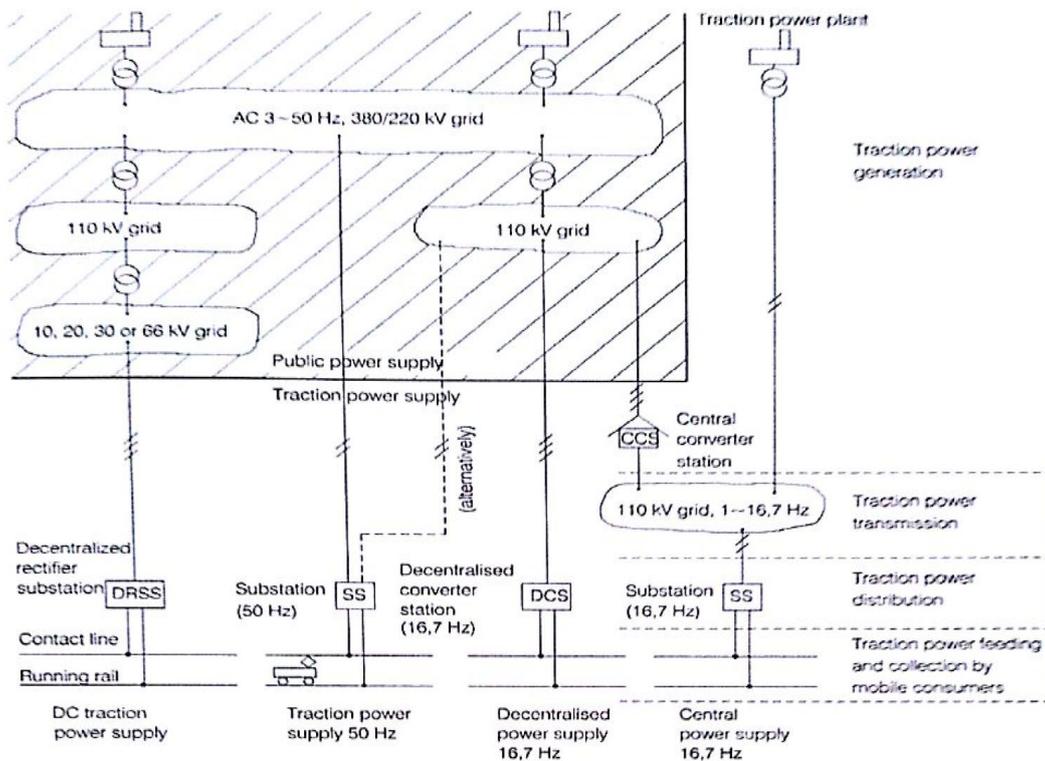


Figura 5.1: Estructura de la alimentación a los sistemas de tracción eléctrica[51]

Tal como se puede apreciar en la Figura 5.1, tanto para sistemas alimentados en continua como en alterna monofásica de frecuencia 50Hz, la energía de tracción se obtiene directamente de la red pública. Las líneas de contacto de sistemas de 15kV, 16,7Hz de alterna se alimentan o bien de redes de transmisión monofásicas de 16,7Hz, o bien de subestaciones convertidoras, las cuales son abastecidas desde la red pública.

5.1. Aterramiento de los sistemas ferroviarios AC y DC

La corriente de tracción regresa a la subestación alimentadora mediante el denominado *circuito de retorno*. Desde el punto de vista eléctrico-ingenieril, el circuito de la línea de contacto y el circuito de retorno constituyen una unidad inseparable.

El uso de los rieles como parte del circuito de retorno es una característica común entre los sistemas de alterna y de continua. Las medidas de puesta a tierra, sin embargo, difieren mucho entre ambos. En los sistemas DC, los rieles son tendidos con una alta resistencia respecto de la tierra y de los sistemas aterrados para evitar corrientes de retorno partiendo de los rieles como corrientes de fuga, causando la corrosión de los componentes metálicos en contacto con la tierra. En la Figura 5.2 se muestra la estricta separación entre el circuito de retorno de las vías y el sistema de aterramiento.

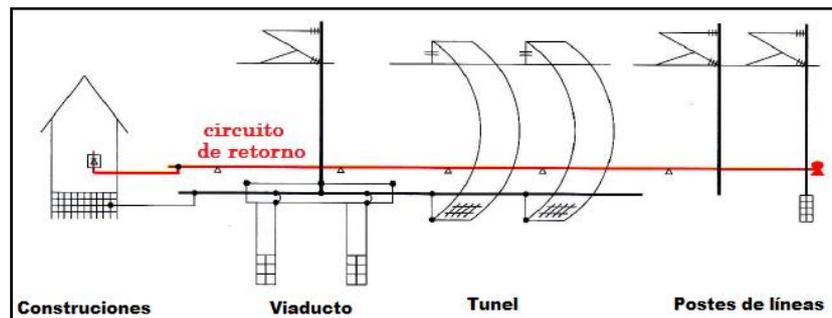


Figura 5.2: Circuito de retorno y aterramiento de los sistemas de tracción en DC[51]

A lo largo de los rieles ocurren caídas de tensión, causando diferencias de potencial entre la vía y la tierra durante la operación normal y en caso de cortocircuito. Debido a que no hay ninguna conexión a tierra, existe un riesgo de que estas diferencias de potencial alcancen valores peligrosos, poniendo en riesgo la seguridad de las

personas. El peligro aparece en líneas superficiales sobre la tierra al aire libre, en túneles, en viaductos y en estaciones y subestaciones contra las estructuras aterradas.

Las corrientes alternas, además de la caída de tensión resistiva que surge en los sistemas DC, presentan una caída de tensión inductiva adicional, que es aproximadamente de la misma magnitud que la componente resistiva a la frecuencia de 16,7Hz y más del doble a 50 o 60Hz. Esto, junto con las secciones de alimentación más largas, llevan a tener potenciales en el riel significativamente más altos que en los sistemas DC a pesar de presentar menores corrientes de operación. Es por ello que, para restringir los potenciales del riel, es necesario conectar el circuito de retorno a tierra, por ejemplo en los rieles y conectando conductores de retorno adicionales a lo largo de la vía y en la subestación. En la Figura 5.3 se muestran las conexiones necesarias entre el circuito de retorno y el aterramiento para sistemas AC (descritos en detalle en la norma EN 50122-1). [51]

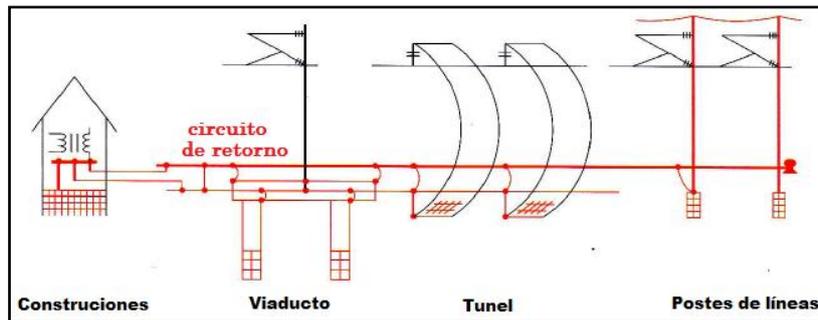


Figura 5.3: Circuito de retorno y aterramiento de los sistemas de tracción en AC[51]

5.2. Circuito de retorno

En sistemas de alimentación convencionales AC y DC, la corriente de operación circula a través del sistema de línea de contacto hasta el vehículo. La corriente de retorno circula desde el vehículo a través del circuito de retorno hasta la subestación.

El retorno de la energía se realiza a través de las vías. Una de sus ventajas es que, como ya están instaladas cuando se construye el sistema ferroviario, se ahorran varios kilómetros de cable. No obstante, cada cierta distancia, se colocan cables de retorno que se conectan directamente a la vía y vuelven a la subestación.

Tal como está definido en la Norma EN 50122-1, el circuito de retorno incluye todos los conductores que forman el camino previsto para la corriente de retorno durante la operación normal y en caso de faltas.

La corriente de tracción fluye a través del sistema de línea de contacto a los vehículos y, por medio del circuito de retorno, vuelve a la subestación de tracción. En principio, los rieles sirven como conductores para la corriente de retorno. Como la resistencia entre los rieles y tierra es finita, y los rieles presentan resistencia longitudinal, una porción de la corriente de retorno va a fluir a tierra y volver a la subestación a través de la misma. Cerca de la subestación, la corriente retorna por los rieles. La suma total de las corrientes fluyendo a través de los rieles, la tierra y cualquier objeto metálico situado paralelo al trayecto ferroviario (como por ejemplo otros conductores o tuberías enterradas) es igual a la corriente fluyendo por la línea de contacto.

Por el circuito de retorno podrían circular hasta varios miles de amperios causando sobretensiones en los rieles y en las partes conductoras del vehículo durante la marcha. Con el fin de evitar estos voltajes que podrían ser potencialmente peligrosos si son puenteados por pasajeros o por el personal del vehículo, los circuitos de retorno deben ser diseñados adecuadamente.

Comparado con los sistemas de transmisión y distribución de potencia trifásicos convencionales, donde los potenciales peligrosos en las partes accesibles pueden únicamente aparecer durante condiciones de falta, los sistemas eléctricos ferroviarios requieren previsiones para asegurar la seguridad de las personas y la protección de las instalaciones incluso durante la operación normal.

Algunas consideraciones comunes se aplican tanto a los sistemas de tracción eléctrica de DC como a los de AC con respecto a las configuraciones de los conductores de retorno. Sin embargo, existen también diferencias fundamentales entre ambos. En los sistemas ferroviarios DC, el nexo entre los rieles y la tierra es completamente galvánico por naturaleza, mientras que en sistemas ferroviarios AC monofásicos, la relación entre todos los conductores (por ejemplo los rieles, tierra, línea de contacto, líneas

alimentadoras secundarias, conductores de retorno, etc.) afecta la forma en que la corriente de retorno se distribuye a lo largo de los caminos conductores.

En los sistemas ferroviarios alimentados en continua, la corriente circulando a través de la tierra puede llevar a la corrosión de las vías por corrientes de fuga, por lo que esta parte de la corriente de retorno debe ser minimizada. La Norma EN 50122-2 trata el tema de las corrientes de fuga en instalaciones de tracción DC y especifica la adecuada aislación que debe existir entre la vía y la tierra. Por esta razón, el circuito de retorno en los sistemas ferroviarios DC no debe ser conectado a tierra o a instalaciones aterradas en general.

Cuando circulan corrientes de operación normal o de cortocircuito a través de los rieles de los sistemas ferroviarios de tracción eléctrica, surgen voltajes que no son despreciables, alcanzando sus valores máximos en los puntos de alimentación y de carga. En los sistemas AC, los voltajes entre los rieles y tierra se reducen debido al aterramiento de los primeros, eliminando cualquier posibilidad de afectar las personas y asegurando que el sistema entero pueda ser aislado seguramente en caso de faltas. Para reducir el voltaje entre riel y tierra en, o cerca de, instalaciones ferroviarias alimentadas en continua, se requieren otras medidas, como por ejemplo, la instalación de conductores paralelos y/o dispositivos limitadores de voltaje. En la siguiente figura se muestran estos dispositivos:



Figura 5.4: Dispositivos limitadores de tension [51]

5.3. Sistemas de tracción de corriente continua

Aproximadamente la mitad de los sistemas ferroviarios eléctricos en el mundo entero se alimentan con corriente continua. En los sistemas de transporte masivo, la tensión nominal más elevada que se utiliza es de 1500V debido al peligro potencial que existe al utilizar tensiones aún más elevadas. Las tensiones que se utilizan comúnmente son 750V y 600V, siendo la distancia entre subestaciones variable entre 1,5 y 6km, dependiendo de la caída de tensión que presente la línea. En tranvías, la potencia de las subestaciones de tracción varía comúnmente entre 1 y 2MW.

La tensión trifásica suministrada por la red pública es rectificadora en las subestaciones de tracción obteniendo, a la salida de las mismas, tensión y corriente continua a la tensión nominal deseada. Antiguamente se utilizaban rectificadores de 6 pulsos 2 vías, pero con el avance de la electrónica de potencia, hoy en día son utilizados rectificadores de 12 pulsos 2 vías, ya que los mismos ayudan a eliminar algunos armónicos. [51]

A su vez, inversores son conectados en paralelo con los rectificadores de modo de poder recuperar la mayor cantidad de energía durante el frenado del tranvía, aumentando el rendimiento del mismo. Este método es considerado de suma importancia hoy en día, ya que en vez de desperdiciar la energía durante el frenado (la cual es disipada en forma de calor en las resistencias de frenado que presentan los tranvías), la misma es recuperada y enviada, a través de la catenaria, a otros tranvías cercanos (en caso de existir) o a la red pública trifásica.

La Figura 5.5 muestra el diseño básico de los sistemas de alimentación de tranvías en corriente continua:

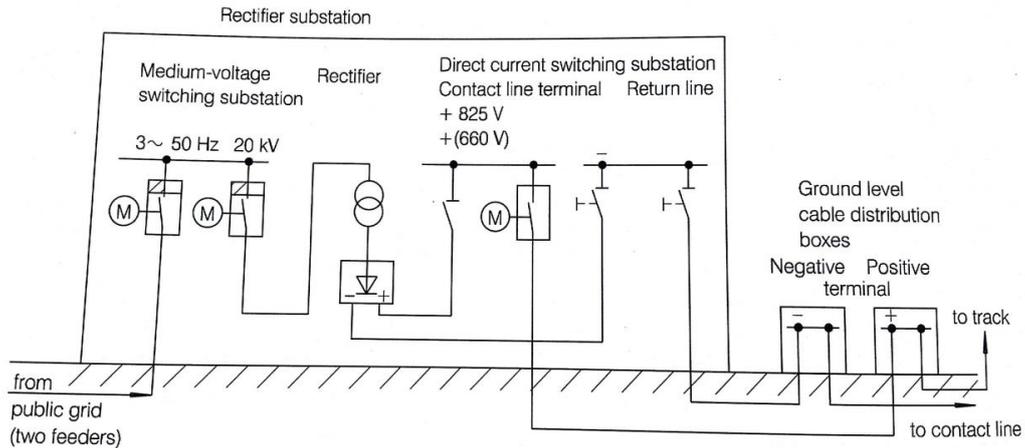


Figura 5.5: Sistema de alimentación de los tranvías en corriente continua. [51]

Este tipo de alimentación de los tranvías presenta las siguientes ventajas:

1. Los motores serie de continua presentan una curva Par-Velocidad sumamente favorable al tener una forma hiperbólica
2. No causa asimetría en la tensión y corriente trifásica de la red pública, ya que se puede suponer al tranvía como una carga (variable) trifásica equilibrada conectada a la red pública

Asimismo, este sistema de alimentación presenta algunas desventajas:

1. Al utilizar valores nominales de tensión bajos, se precisan altas corrientes para transmitirle la potencia necesaria al tranvía
2. Al tener que utilizar corrientes elevadas, mayor es la caída de tensión a lo largo de la catenaria y de la línea de contacto del tranvía

5.4. Sistemas de tracción monofásicos de 16,7Hz

Como otra opción, sistemas AC monofásicos con la frecuencia especial de 16,7Hz pueden ser generados con generadores monofásicos especiales. La relación física $f = p \cdot n$ existe entre la frecuencia f , el número de pares de polos p y la velocidad n del generador. El mínimo número de pares de polos es 1. Por lo tanto, la máxima velocidad a la cual puede operar un generador de 16,7Hz es 1000rpm.

En efecto, un generador de 16,7Hz opera a una velocidad 3 veces menor que un generador de 50Hz en iguales condiciones. Sin embargo, se tiene que $P = C \cdot n$, en donde P es la potencia generada, C es el par en el eje y n es la velocidad del generador. Comparando entonces un generador de 50Hz contra otro de 16,7Hz, es necesario un par en el eje 3 veces mayor en el generador de 16,7Hz de modo de obtener la misma potencia. Pero tres veces mayor par en el eje implica tres veces mayor tamaño del generador. A su vez, los generadores de la red pública son trifásicos, mientras que los de 16,7Hz utilizados en sistemas de tracción son monofásicos, con lo cual el laminado del núcleo del estator es utilizado con un rendimiento $\sqrt{3}$ veces menor en un generador de 16,7Hz. Por lo tanto, podemos suponer que un generador de 16,7Hz es, en principio, $3 \cdot \sqrt{3} \cong 5,2$ veces mayor en volumen que un generador trifásico de 50Hz de la misma potencia nominal.

Cuando estos generadores de 16,7Hz son acoplados en el eje con motores trifásicos de 50Hz alimentados de la red pública (los cuales son utilizados para entregar el par necesario en el eje del generador, de modo de obtener a la salida del mismo la frecuencia deseada), a este tipo de combinación, en los sistemas de alimentación de tracción, se los denomina *convertidores rotativos* (rotating converters). [51]

Este tipo de alimentación de los tranvías presenta las siguientes ventajas:

1. Al utilizar tensiones mayores a los sistemas de corriente continua, las corrientes necesarias para transmitir la potencia son menores
2. Como las corrientes son menores, también es menor la caída de tensión en la catenaria y en la línea de contacto

Sin embargo, este sistema de alimentación presenta algunas desventajas:

1. Causa asimetría en la tensión y corriente trifásica de la red pública, ya que se puede suponer al tranvía como una carga (variable) monofásica conectada a la red pública

2. La corriente alterna por la catenaria, la línea de contacto y al retornar por las vías genera interferencias electromagnéticas indeseadas en cables cercanos, perjudicando a otros usuarios

5.5. Sistemas de tracción monofásicos de 50Hz

La energía necesaria para la operación de las redes de tracción de 50Hz se obtiene de una de las fases de la red pública trifásica. Este tipo de alimentación causa un desbalance en la tensión y corriente trifásica de la red pública, ya que el tranvía es una carga que se conecta a una sola de las fases de la red. Mientras que el desbalance de corriente no tiene mayores efectos en los generadores, el desbalance en la tensión provoca serios efectos en el resto de los consumidores.

El desbalance en la tensión u_U es el cociente entre la tensión inversa V_i y la tensión directa V_d . Asimismo, el desbalance en la tensión es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito S_k'' de la red trifásica de alimentación.

Si se conociese la potencia de tracción S_e necesaria, el desbalance en la tensión en el punto donde se alimenta el tranvía puede ser calculado con suficiente precisión según la ecuación (1):

$$u_U = \frac{V_i}{V_d} \cong \frac{S_e}{S_k} \quad (1)$$

El desbalance en la tensión lleva a una reducción de la vida útil de los motores asíncronos trifásicos. Según la Norma EN 60 034-1, los motores trifásicos solamente pueden operar en sistemas de alimentación en donde el desbalance de la tensión no exceda el 1% en forma permanente o no exceda el 1,5% durante algunos minutos. Para cumplir con estos rigurosos requerimientos, es necesario compensar o limitar el desbalance.

En la práctica, las subestaciones de tracción se conectan en forma cíclica a cada una de las fases de la red pública, de modo de compensar de manera indirecta el

desbalance de la tensión y corriente (ver Figura 5.6). Sin embargo, la operación del tranvía con este tipo de conexionado no resulta ser la óptima.

En los sistemas alimentados según la Figura 5.6, es necesario colocar separadores de fase para poder alimentar la línea de contacto. En dichos separadores, las tensiones aplicadas presentan un desfase de 120° , con lo cual la diferencia de tensión en los separadores es $\sqrt{3}$ veces mayor que la tensión entre fases de la red pública. Esto implica que se tienen mayores caídas de tensión en la línea de contacto, creando condiciones desfavorables para los sistemas de tracción que regeneran energía durante el frenado, ya que la energía resulta menor debido a las mayores caídas de tensión.

Otros tipos de conexionados son utilizados para compensar el desbalance de tensión y corriente, haciendo que los sistemas de alimentación de los tranvías resulten complejos.[51]

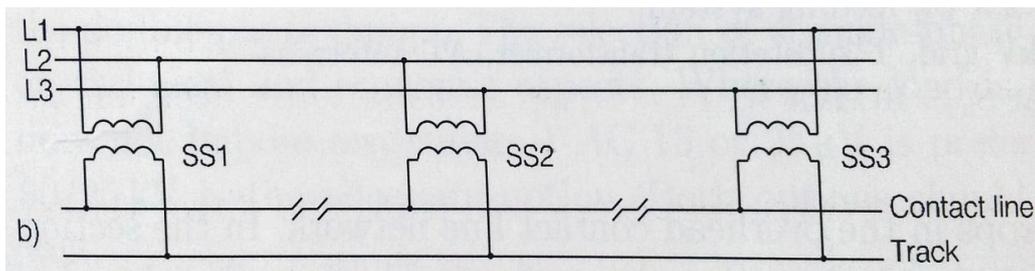


Figura 5.6: Conexión cíclica a las fases de la red de alimentación[51]

Este tipo de alimentación de los tranvías presenta las siguientes ventajas:

1. Al utilizar tensiones mayores a los sistemas de corriente continua, las corrientes necesarias para transmitir la potencia son menores
2. Como las corrientes son menores, también es menor la caída de tensión en la catenaria y en la línea de contacto

Asimismo, este sistema de alimentación presenta algunas desventajas:

1. Causa asimetría en la tensión y corriente trifásica de la red pública, ya que se puede suponer al tranvía como una carga (variable) monofásica conectada a la red pública
2. La corriente alterna por la catenaria, la línea de contacto y al retornar por las vías genera interferencias electromagnéticas indeseadas en cables cercanos, perjudicando a otros usuarios
3. Implementar correcciones para el desbalance de la tensión y la corriente hace complejos los sistemas de alimentación

5.6. Elección de la tecnología de tracción

Analizando los diferentes sistemas de alimentación de tranvías, se opta por realizar el diseño para un tranvía alimentado en continua.

Aproximadamente la mitad de los tranvías del mundo son alimentados en continua, mientras que la otra mitad en alterna (y se siguen construyendo tranvías con ambos tipos de alimentación). Esto demuestra que no existe una tecnología que sea notoriamente superior a la otra. Por este motivo, la elección de la tecnología de tracción fue realizada teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que presentan los diferentes sistemas de alimentación.

Los motores serie de continua presentan una curva Par-Velocidad que resulta favorable para el tranvía debido a su forma hiperbólica. El alto par de arranque que presentan estos motores hace que no sea necesario utilizar arrancadores u otros dispositivos para encender los mismos cuando el tranvía comienza a moverse. A su vez, alimentar el tranvía en continua no causa desbalance en la tensión y corriente trifásica de la red pública, lo cual afectaría a otros usuarios ajenos al tranvía.

Por otro lado, la caída de tensión que se produce en la línea de contacto debido a las elevadas corrientes que son necesarias para transmitir la potencia, pueden reducirse si se alimenta la línea de contacto en varios puntos.

Sin embargo, por más que la corriente sea menor, al alimentar el tranvía en alterna surge el problema del desbalance de tensión y corriente de la red pública. Corregir dicho error hace que los sistemas de alimentación resulten complejos y más costosos, y aún así no se lograría compensar el desbalance por completo. Y lo mismo ocurre con las interferencias electromagnéticas que se generan en cables cercanos; dicho problema se puede solucionar, pero resultaría en un costo mayor.

Dado que 600Vdc y 750Vdc son las tensiones que comúnmente se utilizan en los sistemas de transporte masivo, se optó por diseñar el tranvía para 750Vdc debido a que al ser mayor la tensión, la corriente será menor y lo mismo sucederá con la caída de tensión en la línea de contacto.

5.7. Funcionamiento del tranvía

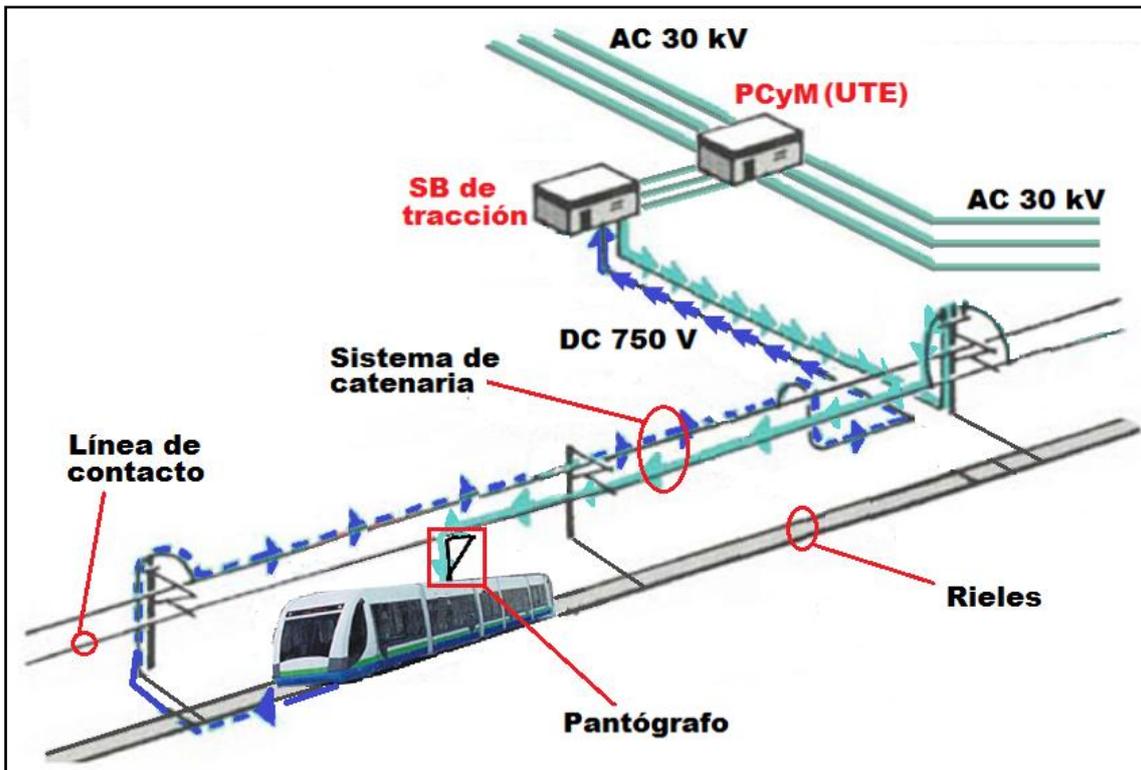


Figura 5.7: Esquema de funcionamiento del tranvía

De la subestación de tracción sale un terminal positivo y otro negativo, los cuales se conectan a la línea de contacto (por medio de la catenaria) y al circuito de

retorno respectivamente. En este caso, de acuerdo a la tecnología de tracción elegida, se tiene una diferencia de tensión de 750Vdc entre ambos terminales.

El *pantógrafo* es un mecanismo articulado que se contacta con la línea de contacto para proporcionar electricidad a los vehículos de tracción. El mismo consiste en un sistema articulado que sujeta un patín, presionándolo contra la línea de contacto, bajo la que se desliza. Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática, para poder alcanzar la línea de contacto independientemente de la altura a la que se encuentre. Este movimiento se realiza mediante cilindros de aire comprimido. Para evitar que el patín se desgaste en un solo punto, la trayectoria de la línea de contacto (y, por ende, de la catenaria) se dispone en zigzag, de modo que va barriendo la mayor parte del patín provocando un desgaste uniforme en toda su superficie.[6]



Figura 5.8: Imagen del pantógrafo[60],[61],[62]

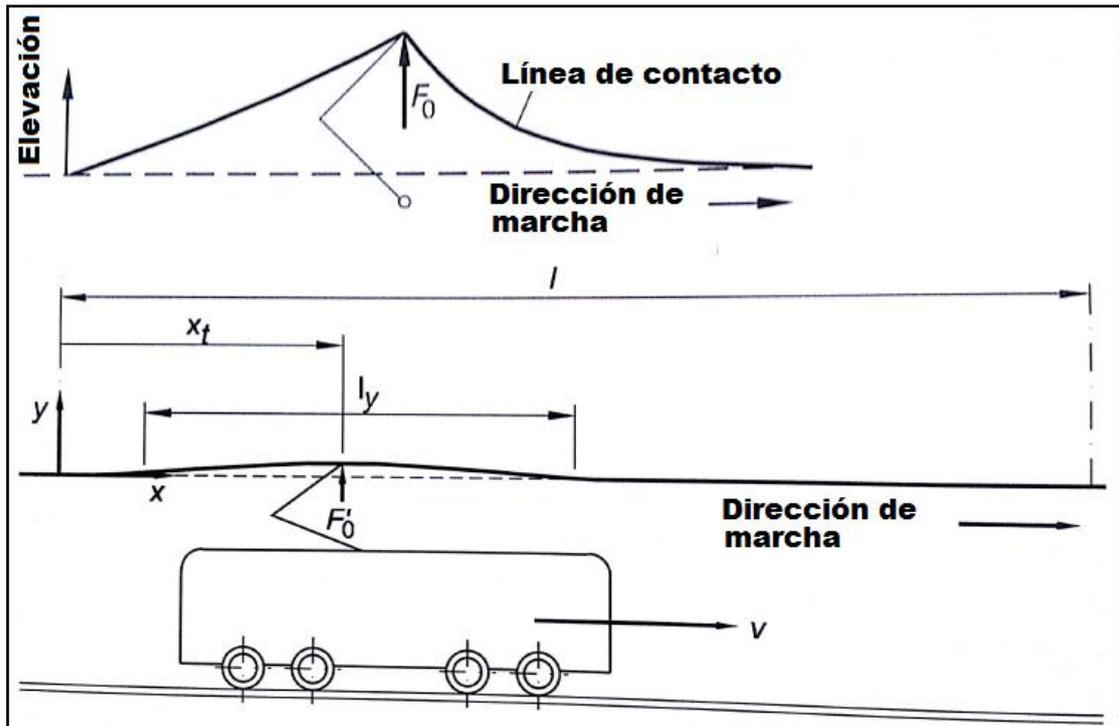


Figura 5.9: Deformación de la línea de contacto[51]

Las *catenarias* son las que sujetan la línea de contacto, haciendo que ésta última se encuentre en línea recta. Existen muchos tipos de catenarias en donde, dependiendo de la explotación, se utilizará un sistema u otro. En otras instalaciones, en vez de existir catenarias existe un tercer carril que realiza la misma función.

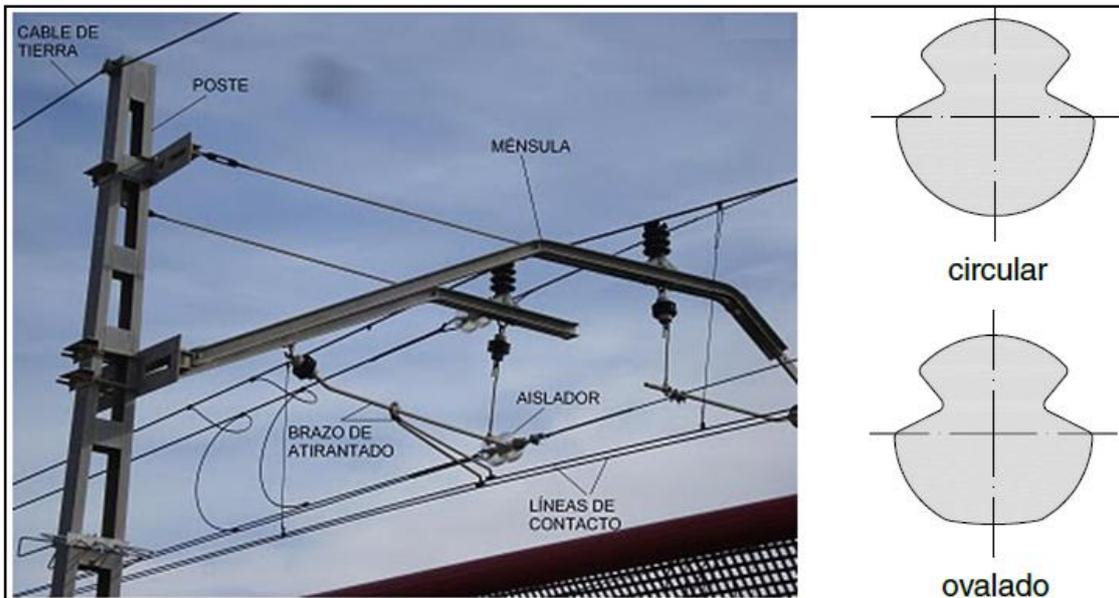


Figura 5.10: Ilustración de catenaria, línea de contacto[100] y perfiles de línea de contacto[52]

En las líneas aéreas, el polo positivo de la instalación es normalmente la catenaria y el negativo son los rieles sobre los que circula el tranvía. La corriente proveniente de la subestación (transformadora o rectificadora de la tensión de la red general) circula por la catenaria, llegando al vehículo a través del pantógrafo, volviendo a la subestación a través de los carriles de la vía férrea. El nombre *catenaria* proviene de la forma geométrica característica de la curva que forma un hilo flexible sometido a su propio peso. Como es lógico, se necesita que el conductor del que el pantógrafo toma la tensión abandone la geometría de la catenaria, aproximándose a una recta paralela a la vía. Por ello, la solución a este problema pasa por instalar un segundo cable, sujeto mediante tirantes de diferente longitud, a la catenaria. Este cable se denomina *cable de contacto* o *línea de contacto*. [5]

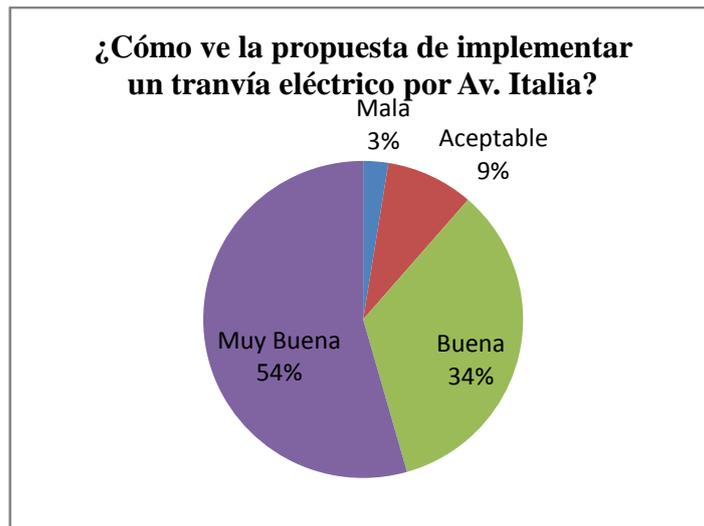
Capítulo 6: Determinación de la trayectoria del tranvía

Al comienzo del proyecto se plantearon dos posibles trayectos a estudiar. Uno era por la Avenida 18 de Julio - Ciudad Vieja, y el otro por Avenida Italia – Aeropuerto – Giannattasio. Se plantearon estos trayectos debido a que, por Av. 18 de Julio, se entiende que el tránsito se encuentra muy embotellado y se complica la circulación por dicha avenida de Montevideo; el segundo trayecto, Av. Italia, fue planteado debido a que se cree que los medios de transporte existentes para viajar hacia el Aeropuerto Internacional de Carrasco o para tomar la Av. Giannattasio son escasos.

Se encuestaron a usuarios del transporte por las dos avenidas estudiadas, peatones y vecinos de las zonas en cuestión, de modo de obtener una idea sobre los pensamientos y gustos de los mismos a la hora de implementar un sistema ferroviario para el transporte de pasajeros. Esta encuesta resulta ser meramente informativa. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la misma:

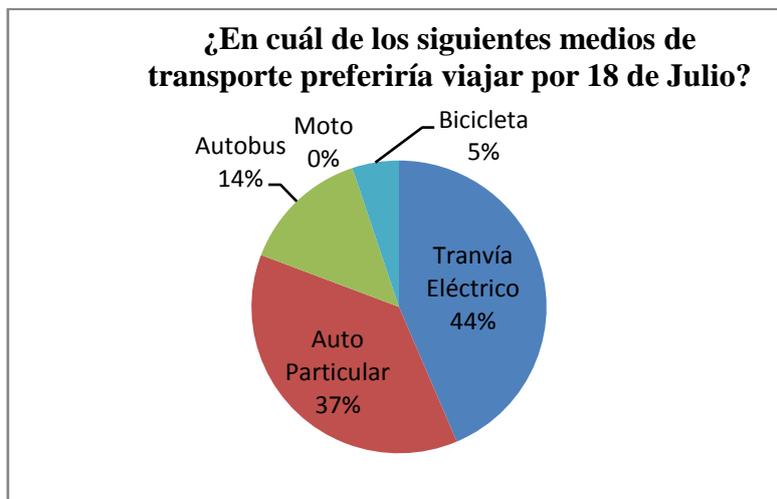


Gráfica 6.1: ¿Cómo ve la propuesta de implementar un tranvía eléctrico por Av. 18 de Julio?

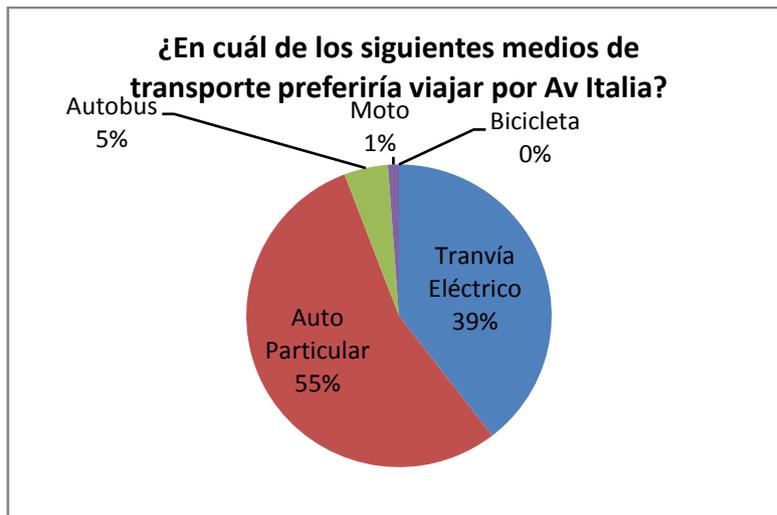


Gráfica 6.2: ¿Cómo ve la propuesta de implementar un tranvía eléctrico por Av. Italia?

Tal como se puede apreciar en las Gráficas 6.1 y 6.2, la gran mayoría de los encuestados cree que sería una buena idea implementar el tranvía en cualquiera de las dos opciones.

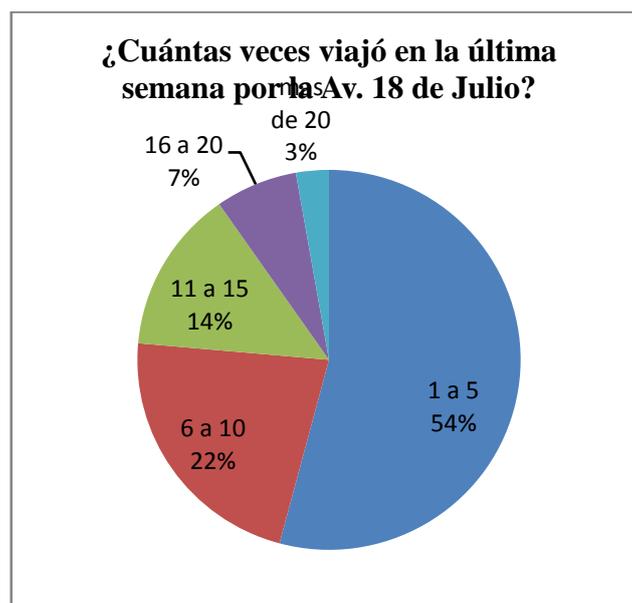


Gráfica 6.3: ¿En cuál de los siguientes medios de transporte preferiría viajar por Av. 18 de Julio?

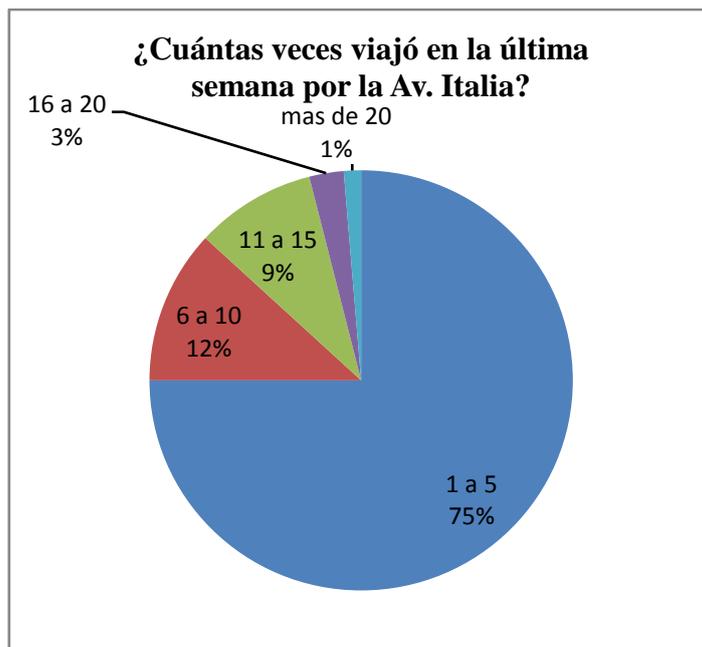


Gráfica 6.4: ¿En cuál de los siguientes medios de transporte preferiría viajar por Av. Italia?

Como se desprende de las Gráficas 6.3 y 6.4, es mayor el número de personas que preferirían viajar en tranvía por Av. 18 de Julio que por Av. Italia.



Gráfica 6.5: ¿Cuántas veces viajó en la última semana por Av. 18 de Julio?



Gráfica 6.6: ¿Cuántas veces viajó en la última semana por Av. Italia?

Un factor importante a tener en cuenta a la hora de determinar la trayectoria por la que circulará el tranvía es el flujo de pasajeros que transitan por los trayectos en cuestión. De las Gráficas 6.5 y 6.6 podemos concluir que el flujo de pasajeros que circula por Av. 18 de Julio es mayor al que circula por Av. Italia.

Como factor de decisión del trayecto del tranvía, luego de una reunión que se mantuvo con el sector Movilidad de la Intendencia de Montevideo, fue sugerido elegir el tramo de Avenida 18 de Julio debido a que no hay ningún proyecto sobre movilidad planteado para esta zona hasta la fecha, y la misma resulta ser una zona crítica en lo que respecta al tránsito vehicular (se adjunta un plano con la trayectoria determinada).

Sin embargo, según los resultados obtenidos en la encuesta, se podría concluir que a la población le resulta de sumo interés realizar un tranvía eléctrico por Avenida Italia, y esta encuesta podría servirle a futuros proyectos sobre el tema.

En las Tablas precedentes se presenta un estudio más detallado de la encuesta referida al trayecto elegido (Av. 18 de Julio). En el mismo se muestra la relación que existe en las respuestas obtenidas según sus respuestas a la pregunta: ¿cómo ve la propuesta de implementar un tranvía eléctrico por Av. 18 de Julio?

	Medio de transporte en el que prefiere viajar				
	Tranvía eléctrico	Auto particular	Autobús	Moto	Bicicleta
Mala	0,0%	7,7%	2,6%	0,0%	1,3%
Aceptable	6,4%	7,7%	5,1%	0,0%	1,3%
Buena	7,7%	10,3%	1,3%	0,0%	1,3%
Muy Buena	28,2%	12,8%	5,1%	0,0%	1,3%

Tabla 6.1: Medio de transporte en el que prefiere viajar

Tal como se desprende de la Tabla 6.1, un 35,9% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena prefieren viajar en el mismo, mientras que un 23,1% de los mismos prefiere viajar en automóvil.

	Cantidad de veces que viajó por Av. 18 de Julio en la última semana				
	1 a 5	6 a 10	11 a 15	16 a 20	Más de 20
Mala	5,8%	1,4%	4,3%	0,0%	0,0%
Aceptable	7,2%	5,8%	1,4%	1,4%	1,4%
Buena	8,7%	4,3%	5,8%	1,4%	1,4%
Muy Buena	34,8%	10,1%	0,0%	4,3%	0,0%

Tabla 6.2: Cantidad de veces que viajó por Av. 18 de Julio en la última semana

Tal como se desprende de la Tabla 6.2, un 12,9% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena han viajado más de 10 veces en la última semana por Av. 18 de Julio, mientras que un 57,9% ha viajado menos de 10 veces por semana. No obstante, lo que importa no es la cantidad de veces que uno transita por dicha avenida, sino la calidad, rapidez y comodidad del servicio de transporte público que se brinda.

	Horario en que viaja usualmente por Av. 18 de Julio			
	08:00 a 12:00	12:00 a 16:00	16:00 a 20:00	20:00 a 08:00
Mala	5,0%	3,0%	3,0%	2,0%
Aceptable	6,0%	2,0%	8,0%	1,0%
Buena	9,0%	6,0%	9,0%	2,0%
Muy Buena	15,0%	10,0%	16,0%	3,0%

Tabla 6.3: Horario en que viaja usualmente por Av. 18 de Julio

Tal como se desprende de la Tabla 6.3, el 71% de los encuestados suelen viajar en las horas pico por el trayecto determinado, mientras que un 29% lo hace fuera de dichas horas.

	¿Cómo cree que afectará a los locales comerciales la implementación del tranvía eléctrico?		
	Positivamente	No los afectará	Negativamente
Mala	1,4%	4,3%	4,3%
Aceptable	11,4%	5,7%	2,9%
Buena	5,7%	12,9%	2,9%
Muy Buena	22,9%	20,0%	5,7%

Tabla 6.4: ¿Cómo cree que afectará a los locales comerciales la implementación del tranvía eléctrico?

Como se puede apreciar en la Tabla 6.4, un 61,5% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena creen que la implementación del tranvía afectará positivamente o no afectará en absoluto a los comerciantes de la zona. Lo que sí queda claro es que, en caso de implementarse el tranvía eléctrico por Avenida 18 de Julio, la misma se convertiría en una calle peatonal, incrementando seguramente el flujo de peatones y favoreciendo el turismo por la zona.

	¿Cómo cree que afectará a los vecinos la implementación del tranvía eléctrico?		
	Positivamente	No los afectará	Negativamente
Mala	4,2%	4,3%	2,8%
Aceptable	12,7%	5,6%	1,4%
Buena	15,5%	5,6%	0,0%
Muy Buena	32,4%	14,1%	1,4%

Tabla 6.5: ¿Cómo cree que afectará a los vecinos la implementación del tranvía eléctrico?

Como se puede apreciar en la Tabla 6.5, un 67,6% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena creen que la implementación del tranvía afectará positivamente o no afectará en absoluto a los vecinos de la zona, mientras que un 1,4% de los mismos cree que los vecinos se verán afectados en forma negativa.

	¿Cree que el sistema de transporte actual satisface la demanda de pasajeros?			
	No	No, pero tiende a mejorar	Sí, pero tiende a empeorar	Si
Mala	2,9%	2,9%	0,0%	4,4%
Aceptable	4,4%	4,4%	8,8%	2,9%
Buena	11,8%	4,4%	4,4%	1,5%
Muy Buena	29,4%	7,4%	5,9%	4,4%

Tabla 6.6: ¿Cree que el sistema de transporte actual satisface la demanda de pasajeros?

Se puede apreciar en la Tabla 6.6 que un 41,2% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena creen que el sistema de transporte actual no satisface la demanda de pasajeros. Simplemente un 5,9% de los mismos cree que se satisface la demanda actual de pasajeros.

	¿Cuáles cree que son las razones para no construir un tranvía?				
	Reducción de la calzada	Costo de realización	Vandalismo	Costo de mantenimiento	Trayectoria fija y única
Mala	7,7%	4,6%	0,0%	1,5%	1,5%
Aceptable	13,8%	1,5%	0,0%	1,5%	3,1%
Buena	12,3%	4,6%	1,5%	3,1%	0,0%
Muy Buena	15,4%	16,9%	6,2%	3,1%	1,5%

Tabla 6.7: ¿Cuáles cree que son las razones para no construir un tranvía?

Tal como se desprende de la Tabla 6.7, varios son los motivos por los cuales los encuestados creen que no es conveniente construir un tranvía eléctrico, sin haber un motivo en especial que sobresalga sobre los demás.

	¿Cuánto pagaría por un pasaje?		
	\$10	\$20	Más de \$20
Mala	5,7%	2,9%	0,0%
Aceptable	8,6%	5,7%	5,7%
Buena	5,7%	12,9%	4,3%
Muy Buena	21,4%	15,7%	11,4%

Tabla 6.8: ¿Cuánto pagaría por un pasaje?

Como se puede observar en la Tabla 6.8, más de la mitad de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena pagarían \$20 o menos por un boleto, siendo un 15,7% de los mismos los que estarían dispuestos a pagar más de \$20 por un boleto. Una forma de contrarrestar esto podría ser implementar boletos que sean válidos para viajes durante 1 hora o durante 2 horas, tal como se realiza actualmente con el autobús.

	¿Cómo ve la creación de un sistema de parking en algún lugar del recorrido, de modo que el usuario pueda aparcar su coche y utilizar el tranvía?			
	Mala	Aceptable	Buena	Muy Buena
Mala	2,8%	2,8%	2,8%	1,4%
Aceptable	0,0%	8,5%	4,2%	8,5%
Buena	5,6%	4,2%	7,0%	5,6%
Muy Buena	1,4%	5,6%	4,2%	35,2%

Tabla 6.9: ¿Cómo ve la creación de un sistema de parking en algún lugar del recorrido?

Se puede apreciar en la Tabla 6.9 que un 52% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena creen que la implementación de un sistema de parking en algún lugar del recorrido es Buena o Muy Buena. Tal vez, para contrarrestar las respuestas obtenidas en la Tabla 6.8, se pueda crear algún sistema mediante el cual los usuarios del tranvía aparcan sus vehículos en el parking y ese mismo boleto (de pago del estacionamiento) les sirva para viajar en el tranvía. De este modo, los usuarios estarían ahorrando dinero cada vez que desean viajar en tranvía, y se fomenta a que los mismos lo utilicen.

	¿Cree usted que el tranvía mejorará el sistema de transporte urbano?	
	Si	No
Mala	2,8%	8,3%
Aceptable	12,5%	5,6%
Buena	18,1%	2,8%
Muy Buena	47,2%	2,8%

Tabla 6.10: ¿Cree usted que el tranvía mejorará el sistema de transporte urbano?

Tal como desprende de la Tabla 6.10, el 65,3% de los encuestados que dicen que la propuesta de implementar el tranvía es Buena o Muy Buena creen que la implementación del tranvía mejorará el sistema de transporte urbano, mientras que el 5,6% de los mismos creen que no será así. Esta respuesta se complementa con las obtenidas en la Tabla 6.6, en donde un 48,5% del total de las personas encuestadas creen que el sistema de transporte urbano actualmente no satisface la demanda de

pasajeros, mientras que únicamente un 13,2% del total de encuestados cree que si se satisface.

	¿Con qué fin utiliza el transporte público?					
	Trabajar	Estudiar	Llevar hijos colegio / club	Deportes / Actividad física	Paseo / Esparcimiento / Turismo	Otras actividades
Mala	2,5%	1,6%	0,0%	0,0%	1,6%	1,6%
Aceptable	6,6%	6,6%	0,8%	1,6%	2,5%	2,5%
Buena	8,2%	6,6%	0,0%	0,0%	1,6%	4,9%
Muy Buena	19,7%	10,7%	0,8%	0,8%	6,6%	12,3%

Tabla 6.11: ¿Con qué fin utiliza el transporte público?

Tal como se desprende de la Tabla 6.11, varios son los motivos por los cuales los encuestados utilizan el transporte público, siendo para trabajar y estudiar los que sobresalen frente a los demás.

	¿Cuánto tiempo demora su viaje en autobús desde que se sube hasta que desciende del mismo?					
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos o más
Mala	6,3%	3,1%	0,0%	1,6%	0,0%	0,0%
Aceptable	3,1%	6,3%	3,1%	3,1%	1,6%	0,0%
Buena	3,1%	12,5%	4,7%	1,6%	0,0%	0,0%
Muy Buena	7,8%	20,3%	9,4%	6,3%	3,1%	3,1%

Tabla 6.12: ¿Cuánto tiempo demora su viaje en autobús desde que se sube hasta que desciende del mismo?

Como se puede apreciar en la Tabla 6.12, el 62,5% de los encuestados demora menos de 20 minutos cuando viaja en autobús. En este aspecto, tal parece que la gente se encuentra conforme con la rapidez del transporte público.

	¿Cuánto tiempo demora esperando que pase el autobús?				
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	Más de 40 minutos

Mala	10,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Aceptable	13,6%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%
Buena	15,2%	6,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Muy Buena	43,9%	7,6%	1,5%	0,0%	0,0%

Tabla 6.13: ¿Cuánto tiempo demora esperando que pase el autobús?

Tal como se desprende de la Tabla 6.13, el 83,3% de las personas encuestadas demora tan solo 10 minutos esperando para tomar el autobús. Estas respuestas se complementan con las de la Tabla 6.12, concluyendo que, por más que a algunas personas les parezca que se satisface la demanda actual de pasajeros o no, lo que sí queda claro es que la enorme mayoría de las personas encuestadas está conforme con la rapidez del transporte público.

Capítulo 7: Frecuencia de Paso y Potencia de las Subestaciones

Cálculo de la Frecuencia de Paso

Durante el correr del día, la cantidad de tranvías que circularían por el trayecto es variable. De los datos brindados por la Intendencia de Montevideo sobre la cantidad de personas que utilizan el autobús diariamente por la Avenida 18 de Julio, se puede estimar la cantidad de pasajeros que, en caso de que circulase un tranvía en vez de autobuses, utilizaran el mismo. Estos datos se presentan en la Tabla 7.1:

Hora	Cantidad de Pasajeros	Hora	Cantidad de Pasajeros
0	776	12	9924
1	327	13	9949
2	243	14	10478
3	84	15	11683
4	127	16	12307
5	663	17	13156
6	1530	18	13162
7	3099	19	9755
8	5013	20	5912
9	5607	21	3815
10	6270	22	2597
11	9253	23	1696

Tabla 7.1: Cantidad de pasajeros por hora que utilizan el transporte público por la Av. 18 de Julio

Estos datos son meramente una estimación, que resultan útiles a la hora de calcular la cantidad de tranvías necesarios para que esa gente pueda llegar a destino. Los datos de pasajeros son únicamente por la Av. 18 de Julio. Con esto, las personas que viajan en autobús por las calles aledañas no están siendo tenidas en cuenta.

Asimismo, dado que el tranvía ha de circular por esta avenida, los autobuses podrían eventualmente circular por las calles cercanas, con lo cual las personas, a la hora de viajar, podrían optar por utilizar el tranvía o el autobús.

Con esto, lo que se está tratando de establecer es que los datos obtenidos, por más que sean únicamente por 18 de Julio, resultan representables de la cantidad de gente que utilizaría el tranvía.

Ahora bien, se sabe que la capacidad de pasajeros del tranvía es de 300 pasajeros. Sabiendo, a su vez, que la velocidad media a la que circula el mismo es de 35km/h, para un recorrido de 10,5km y asumiendo un tiempo de maniobras de 10 minutos, queda determinado el tiempo que demora el tranvía en realizar el recorrido:

$$t_{ciclo} = \frac{Distancia}{v_{media}} \cdot 60 + t_{maniobras} = \frac{10,5km}{35\frac{km}{h}} \cdot 60 + 10min = 28min \quad (1)$$

Conociendo el tiempo que demora el tranvía en recorrer el trayecto, se puede calcular la cantidad de veces que recorre el mismo por hora:

$$N^{\circ} \text{ deciclos de tranvía} = \frac{60min}{t_{ciclo}} = \frac{60min}{28\frac{min}{ciclo}} \cong 2.14 \text{ ciclos} \quad (2)$$

Si se considera un porcentaje de ocupación del tranvía del 100%, entonces la máxima cantidad de pasajeros que el tranvía es capaz de trasladar por hora queda determinada según la ecuación (3):

$$N^{\circ} \text{ máximo de pasajeros/tranvía/hora} = N^{\circ} \text{ ciclos} \cdot \frac{N^{\circ} \text{ pasajeros}}{\text{tranvía}} \cdot \% \text{ Ocupación} \quad (3)$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente en la ecuación (3), la máxima cantidad de pasajeros que transporta el tranvía por hora es la siguiente:

$$N^{\circ} \text{ máximo de pasajeros/tranvía/hora} = 2,14 \text{ ciclos} \cdot 300 \frac{\text{pasajeros}}{\text{tranvía}} \cdot 100\% = 642 \text{ pasajeros}$$

Ahora sí, conociendo la capacidad máxima de transporte de pasajeros que tiene un tranvía, y conociendo la cantidad de pasajeros que utilizan por hora el transporte público, se puede determinar la cantidad de tranvías necesarios, por hora, para que dichas personas puedan trasladarse. La cantidad de tranvías necesarios por hora se determina mediante la ecuación (4).

$$N^{\circ} \text{ de tranvías necesarios} = \frac{\text{Cantidad de pasajeros / hora}}{N^{\circ} \text{ máximo de pasajeros / tranvía / hora}} \quad (4)$$

Asimismo, conociendo el número de tranvías necesarios y sabiendo el número de ciclos del tranvía, queda determinada la frecuencia de paso de los mismos (la frecuencia de paso se define como el tiempo de espera entre la partida de un tranvía y la partida del siguiente). La frecuencia de paso se calcula utilizando la ecuación (5).

$$\text{Frecuencia de Paso} = \frac{\text{Tiempo del recorrido}}{N^{\circ} \text{ de ciclos} \cdot N^{\circ} \text{ de tranvías}} \quad (5)$$

En la Tabla 7.2 se presentan el número de tranvías necesario y la frecuencia de paso, por hora, utilizando la cantidad de pasajeros de la Tabla 7.1 y las ecuaciones (4) y (5):

Hora	N° de tranvías necesarios	Frecuencia de Paso (min)	Hora	N° de tranvías necesarios	Frecuencia de Paso (min)
0	2	14,0	12	16	1,8
1	1	28,0	13	16	1,8
2	1	28,0	14	17	1,6
3	1	28,0	15	19	1,5
4	1	28,0	16	20	1,4
5	2	14,0	17	21	1,3
6	3	9,3	18	21	1,3
7	5	5,6	19	16	1,8
8	8	3,5	20	10	2,8
9	9	3,1	21	6	4,7
10	10	2,8	22	5	5,6
11	15	1,9	23	3	9,3

Tabla 7.2: Número de tranvías necesarios por hora y Frecuencia de Paso

Potencia de las Subestaciones de Tracción

Situando las paradas del tranvía cada 500m, mediante la ecuación (6) se obtiene el tiempo que demora el tranvía en ir de una parada a otra:

$$Tiempo\ entre\ paradas = \frac{Distancia\ entre\ paradas\ (km)}{v_{media}\ (\frac{km}{h})} \cdot 60 \quad (6)$$

El tiempo entre paradas resulta ser:

$$Tiempo\ entre\ paradas = \frac{0,5km}{35\ \frac{km}{h}} \cdot 60 \cong 0,9min$$

Dado que el trayecto es de 10,5km y las paradas están situadas cada 500m, se obtiene un total de 21 paradas. Pero en la realidad, el recorrido efectivo del tranvía es de 10km aproximadamente, ya que los restantes 500m corresponden a la zona donde se encuentra ubicado el depósito en donde los tranvías se guardan cuando no son utilizados. Con esto, efectivamente son 20 las paradas del tranvía.

La distancia entre las subestaciones de tracción varía entre 1,5 y 6,0km. En este caso, se colocarán las subestaciones cada 2,1km de modo tal que, en total, sean necesarias 5 subestaciones de tracción para alimentar todo el sistema férreo, en donde cada subestación irá a alimentar un tramo de recorrido de 2,1km.

De este modo, conociendo la cantidad de paradas y la cantidad de subestaciones de tracción necesarias para alimentar el sistema férreo, se halla la cantidad de paradas entre subestaciones:

$$Paradas\ por\ SSEE = \frac{Cantidad\ de\ paradas}{Cantidad\ de\ subestaciones} = \frac{20}{5} = 4 \quad (7)$$

Utilizando la ecuación (8) se calcula el tiempo que demora el tranvía en pasar de estar alimentado por una subestación a estar alimentado por otra (recordar que cada subestación de tracción alimenta 2,1km de trayecto):

$$Tiempo\ entre\ SSEE = \frac{Dist.\ entre\ SSEE}{v_{media}} + \frac{t_{maniobras}}{Cantidad\ paradas} \cdot Cantidad\ paradas / SSEE \quad (8)$$

El tiempo entre subestaciones resulta ser:

$$Tiempo\ entre\ SSEE = \frac{2,1km}{35\frac{km}{h}} \cdot 60 + \frac{10min}{20} \cdot 4 = 5,6min$$

Ahora bien, conociendo el tiempo entre subestaciones, y utilizando los valores de frecuencia de paso de la Tabla 7.2, se puede calcular la máxima cantidad de tranvías que alimentará una subestación de tracción:

$$Máximacantidadde\ tranvías = \frac{TiempoentreSSEE}{MínimaFrecueciadePaso} = 4\ tranvías \quad (9)$$

De la bibliografía utilizada se obtiene la potencia de cada motor del tranvía, la cual es de 120kW. A su vez, cada tranvía dispone de 4 motores, con lo cual la potencia de tracción del tranvía resulta ser 480kW. A esto, hay que sumarle la potencia que consume el tranvía por concepto de servicios auxiliares (ya sea luces, apertura automática de las puertas, etc.). Con esto, la potencia total que consume un tranvía es de 545kW.

Conociendo la potencia total que consume un tranvía, y sabiendo que 4 es la máxima cantidad de tranvías que ha de alimentar una subestación de tracción, entonces se concluye que la potencia máxima de tracción que ha de consumir cada subestación resulta ser:

$$P_{max} = 545kW \cdot 4 = 2,2MW$$

Dado que el tranvía se alimenta con corriente y tensión continua, la reactiva que consume es nula, con lo cual se cumple que:

$$S_{max} = P_{max} = 2,2MVA$$

A su vez, a la potencia de tracción hay que sumarle la potencia de los servicios auxiliares de la subestación de tracción, para así poder obtener la potencia total que va a consumir la misma. El valor de la potencia que consumen los servicios auxiliares de las subestaciones de tracción se encuentra calculado más adelante en este documento. Sin embargo, se estimará un consumo máximo de potencia de $S=2,5MVA$.

Capítulo 8: Elección de la tensión a la cual se insertan las subestaciones de tracción

8.1. Introducción

Dado que en la red eléctrica de la zona de estudio existen dos niveles de Media Tensión para alimentar el sistema ferroviario (30kV y 6kV), se debe decidir cuál de las dos es la más apropiada para realizar las inserciones de las subestaciones de tracción. Para esto se debe tener en cuenta tanto los aspectos económicos como los técnicos.

Existe un compromiso entre ambos aspectos ya que, por ejemplo, en cables de Media Tensión, a mayor tensión de aislación, los costos de los mismos son más elevados pero estos tienen mayor capacidad de transportar energía y viceversa. Para el análisis de los tendidos con nuevos conductores se toman como referencia los conductores con los cuales UTE diseña en la actualidad: XLPE 500A en 30kV y XLPE 240A en 6kV.

Se debe tener en cuenta, en la comparación económica de los equipos de las estaciones de Media Tensión, que no debe compararse equipos Clase 36kV con Clase 7,2kV, sino que debe compararse equipos Clase 36kV con Clase 24kV, por lo que la brecha económica es menor de la esperada a priori. Esto se debe a que, como UTE está desarrollando un proyecto de modificación de su red de distribución de Media Tensión, en el que se eliminarán las tensiones intermedias de 6,3kV, 15kV y 31,5kV, dejando una sola tensión de distribución que será 22kV, en todos los nuevos proyectos se exige que las instalaciones del cliente se realicen contemplando este cambio de tensión y el equipamiento de Media Tensión debe ser Clase 24kV.

8.2. Inserción en 6kV

Los cables XLPE 240A admiten una corriente máxima de 415A, es decir, a tensión nominal de 6,4kV admiten una potencia de:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 6,4kV \cdot 415A \cong 4,6MVA$$

Si se considera que cada subestación de tracción consume un máximo de 2,5MVA y dos pares de subestaciones comparten el mismo Puesto de Conexión y Medida (para mayor viabilidad económica), en alimentación normal circularían 5MVA, por lo que se deberían de tender 2 cables y partir la barra del PCyM como se muestra en el unifilar de la Figura 8.1.

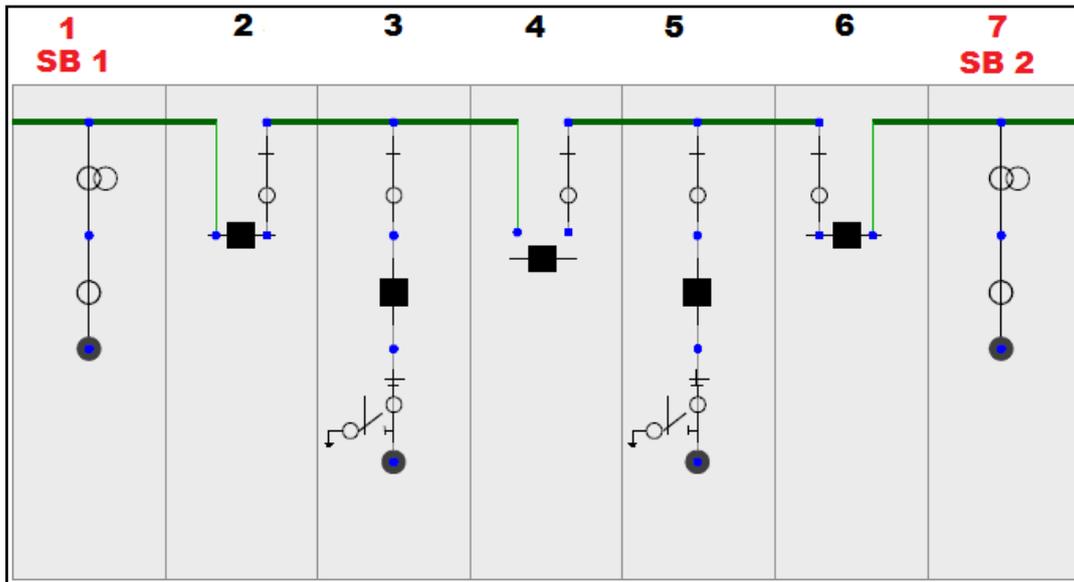


Figura 8.1: Unifilar del PCyM de las subestaciones de tracción dobles (Elaboración propia utilizando simbología del software MAR EGEO)

La Figura 8.2 muestra un esquema de la configuración en alimentación normal de las subestaciones de tracción dobles. En esta situación, ante una falta en alguno de los dos cables que alimentan el PCyM, se maniobra el acople de barras de forma de dar respaldo a las dos subestaciones por uno de los cables de alimentación normal como se muestra en las Figuras 8.3 y 8.4.

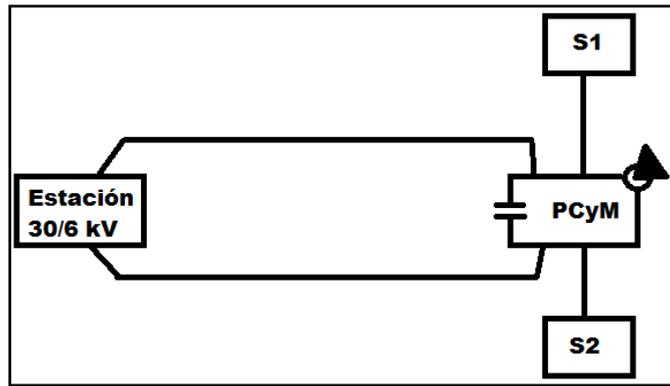


Figura 8.2: Esquema de la configuración en alimentación normal de las subestaciones dobles

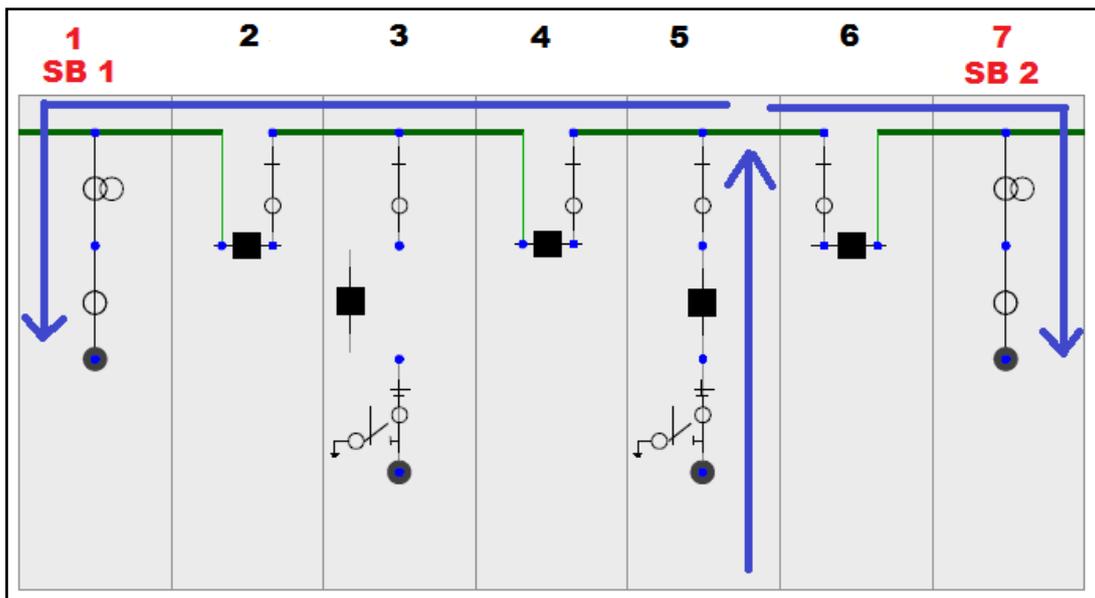


Figura 8.3: Unifilar del PCyM en configuración N-1 (Elaboración propia utilizando simbología del software MAR EGEO)

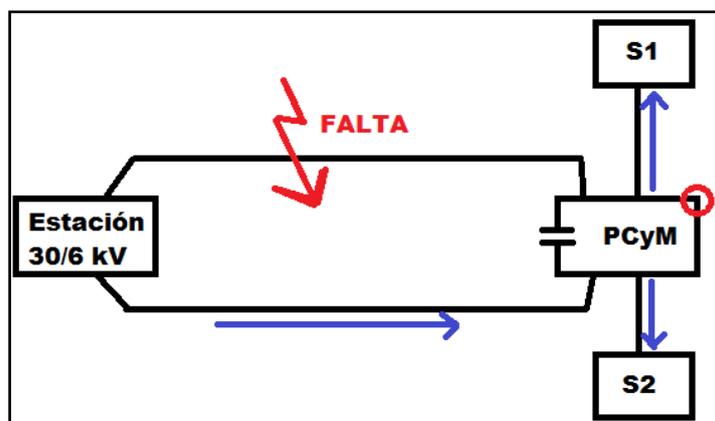


Figura 8.4: Esquema de la configuración N-1 de las subestaciones dobles

Las Tablas 8.1 y 8.2 muestran la carga que deben soportar los cables en configuración N-1 para distintos factores de carga probabilizada y la carga admisible por los cables para distintos porcentajes de sobrecarga respectivamente. El concepto de carga probabilizada supone el valor de la carga considerada multiplicada por un factor menor o igual a 1:

fp	S(MVA)
1	5,0
0,9	4,5
0,8	4,0

Tabla 8.1: Carga que deben soportar los cables según la carga probabilizada

Carga admisible(%)	Sadm(MVA)
100	4,60
110	5,06
120	5,52

Tabla 8.2: Potencia máxima admisible por los cables según la carga

Se observa que con factor de carga probabilizada unitario y considerando el 100% de la carga no es posible suministrar el total de la energía requerida a las dos subestaciones ($S_{2_SSEE} > S_{admisible_CMT}$), pero si se considera carga probabilizada al 90% y que los cables en configuración N-1 admiten 120% la solución es factible.

A continuación se estudia la carga de los transformadores en las estaciones de transformación 30/6kV aledañas al trayecto del tranvía.

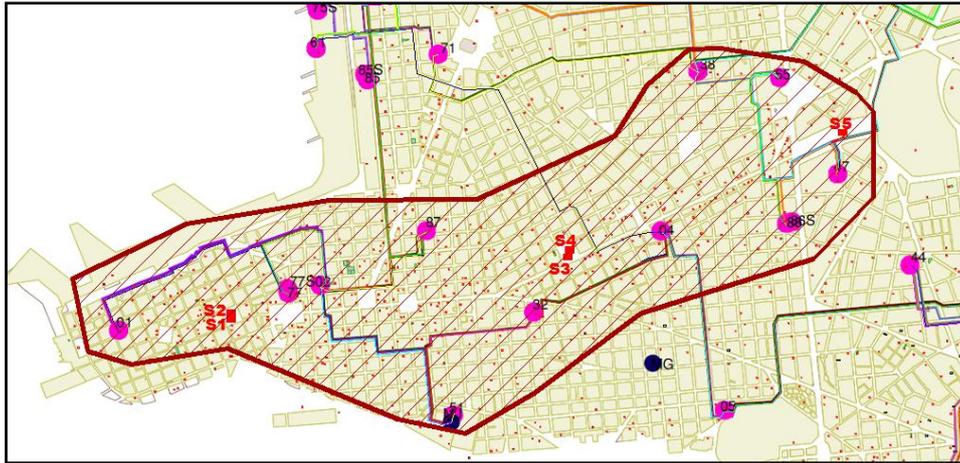


Figura 8.5: Zona aledaña al trayecto del tranvía[98]

ESTACION	Potencia instalada (MVA)			Potencia de diseño de la estación (MVA)	Carga invierno 2012 (MVA)*			Pdiseño-Pactual (holgura)	holgura considerando carga probabilizada con factor de 0,9 **	Carga invierno 2012 (% S/Sn)*		
	TR01	TR02	TR03		TR01	TR02	TR03			TR01	TR02	TR03
E01	10	10	10	20	5,89	6,43	4,70	2,99	4,69	58,9	64,3	47,0
E77	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
E02	10	10	10	20	8,56	4,17	6,47	0,81	2,73	85,6	41,7	64,7
E87	10	10	10	20	5,65	5,78	4,37	4,19	5,77	56,5	57,8	43,7
E32	10	10	10	20	9,49	4,76	9,43	-3,68	-1,31	94,9	47,6	94,3
E51	10	10	10	20	6,30	4,04	0,00	9,66	10,70	63,0	40,4	0,0
E04	10	10	10	20	5,55	7,71	5,97	0,77	2,70	55,53	77,08	59,67
E86	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
E47	10	10	-----	10	1,65	2,31	-----	6,05	6,44	16,46	23,08	-----
E65	10	10	-----	10	2,87	2,99	-----	4,14	4,73	28,7	29,9	-----
E38	10	10	10	20	5,57	5,98	4,65	3,80	5,42	55,7	59,8	46,5

* máximos por trafo el día 25/07/12 (día en que se registró máximo nacional)
 ** = (Potencia de diseño - 0,9 * (ΣPactual_Tri))

Tabla 8.3: Carga en los transformadores de las estaciones 30/6kV aledañas al trayecto del tranvía[98]

Las estaciones son diseñadas para que puedan operar en configuración normal a la potencia instalada total menos la potencia de un transformador (“potencia de diseño”). Esto se realiza de este modo previendo el respaldo de un transformador ante la posible salida de otro. En este caso, todas las estaciones aledañas a la zona de estudio tienen transformadores de 10MVA, teniendo algunas tres transformadores y otras dos. Es por tanto que las estaciones de tres transformadores se pensaron para operar a una potencia aproximada de 20MVA y las de dos a una potencia de 10MVA.

En la Tabla 8.3 se indica, en MVA, la diferencia entre la potencia de diseño y la potencia actual de cada estación. A su vez, en color rojo están resaltadas las holguras de potencia mayores a 2,5MVA (potencia máxima de las subestaciones de tracción).

Se observa que en principio no hay nada sustantivo que indique que no se pueden realizar las inserciones de las subestaciones de tracción en 6kV, ya que varios transformadores de estaciones no presentan grandes cargas. Debe de estudiarse también, no solo que haya holgura libre de potencia en los transformadores de las estaciones 30/6kV existentes, sino además que en las estaciones donde se insertarían las subestaciones de tracción existan celdas libres en 6kV, espacio físico para las celdas, etc. Es por ello que se decide analizar las celdas de 6kV de las Estaciones 01, 02, 87, 51, 04, 47, 65 y 38.

Las celdas con transformadores de corriente (TI) se pueden considerar “libres”, es decir, se pueden usar para conectar nuevas salidas en 6kV. A continuación se muestran los diagramas unifilares en 6kV de las estaciones aledañas, donde se indican las celdas libres:

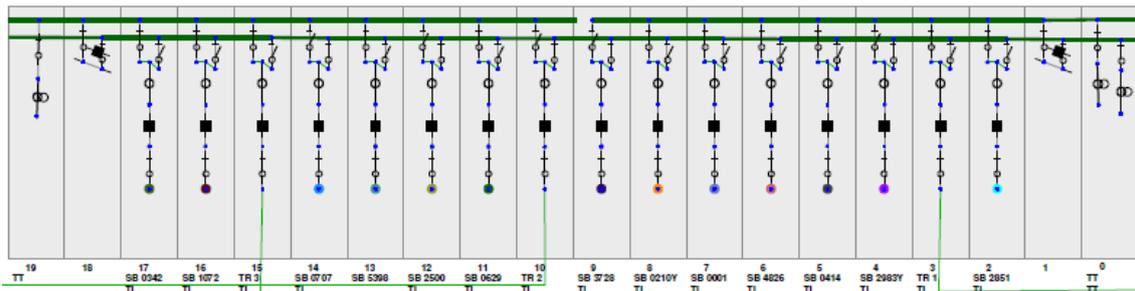


Figura 8.6: Unifilar de la Estación 01[98]

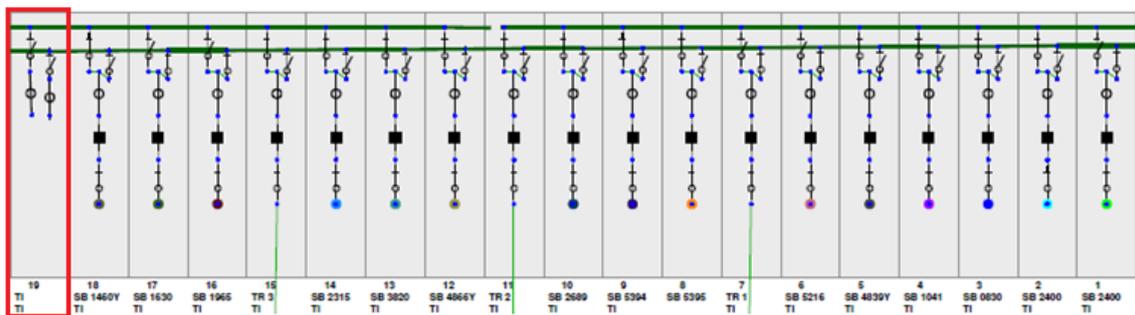


Figura 8.7: Unifilar de la Estación 02[98]

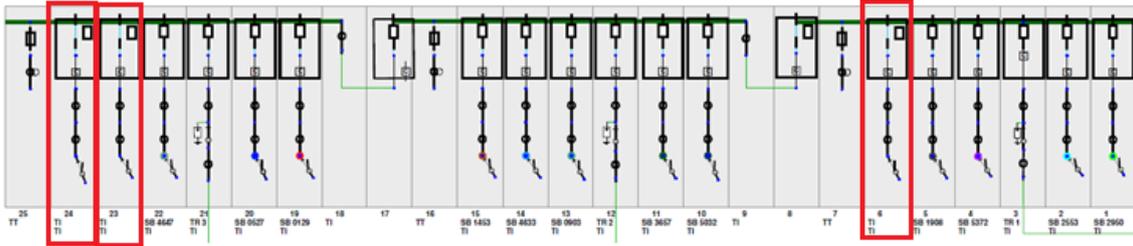


Figura 8.8: Unifilar de la Estación 87[98]

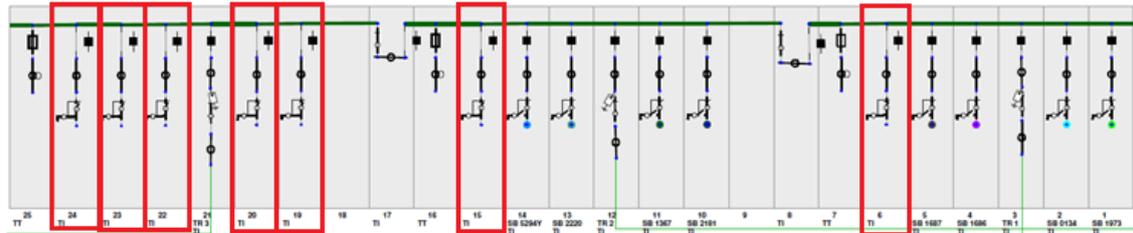


Figura 8.9: Unifilar de la Estación 51[98]

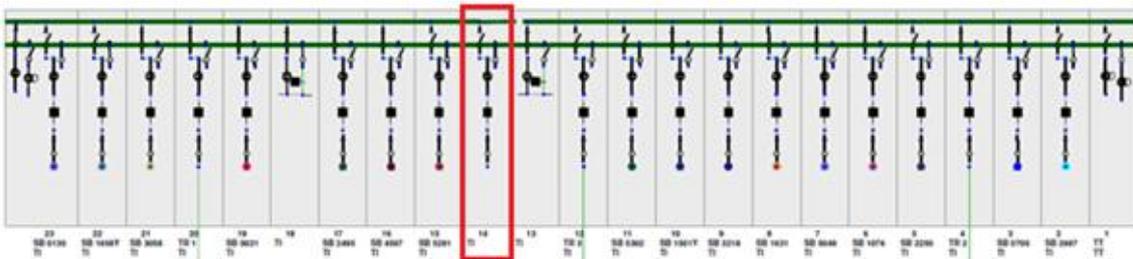


Figura 8.10: Unifilar de la Estación 04[98]

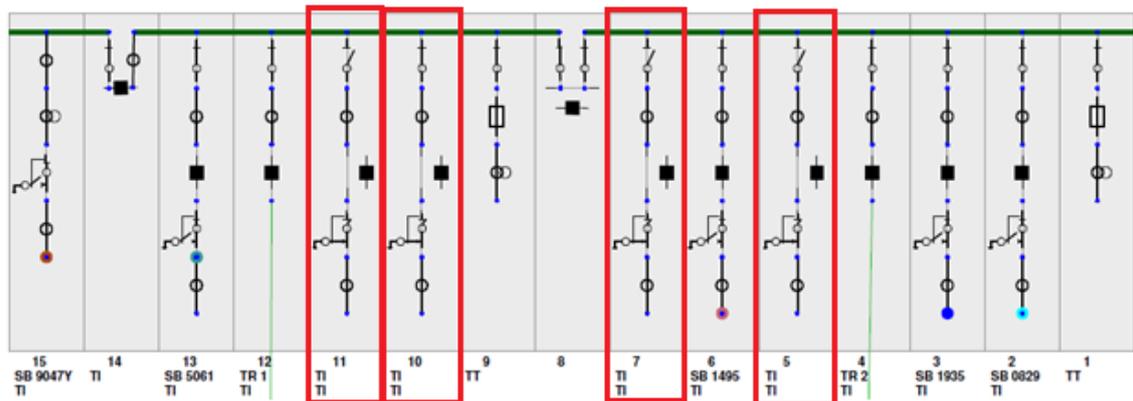


Figura 8.11: Unifilar de la Estación 47[98]

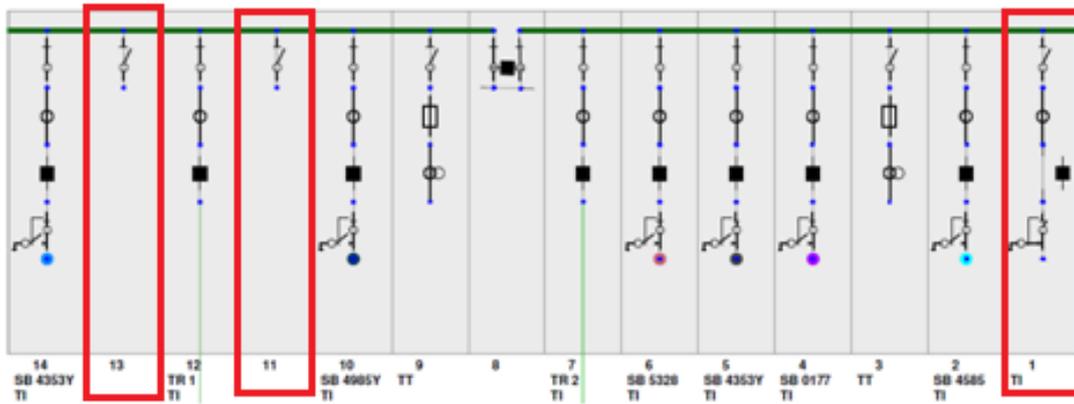


Figura 8.12: Unifilar de la Estación 65[98]

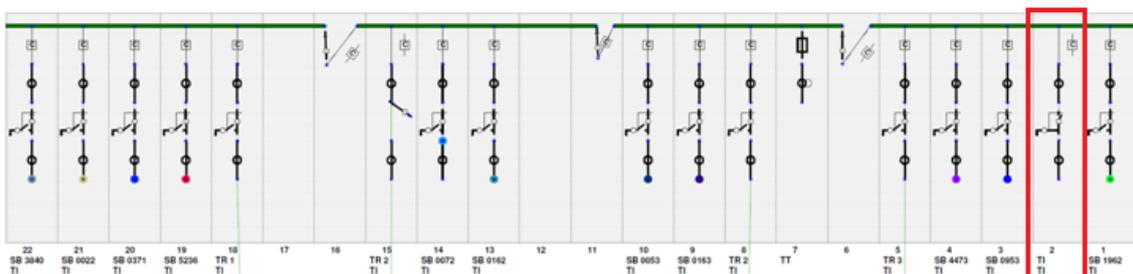


Figura 8.13: Unifilar de la Estación 38[98]

Según los unifilares en 6kV de las estaciones anteriormente mencionadas, se pueden tender dos cables de Media Tensión desde celdas “libres” existentes en E87 y E01 para alimentar las subestaciones de tracción S1 y S2, 2 CMT desde E87 (o E51) para alimentar S3 y S4, y 2 CMT desde E47 para alimentar la subestación de tracción S5. Para este análisis no se consideraron posibles futuras remodelaciones en las estaciones (por ejemplo, la actual E02 pasará a ser la E96 ubicada en frente a la ubicación actual).

Hasta ahora tampoco debe descartarse la opción de proyectar una estación de transformación 30/6kV exclusiva para la alimentación del tranvía cerca del “baricentro de carga” y tender cuatro cables de Media Tensión en 6kV desde dicha estación hasta las dos subestaciones de tracción dobles y dos cables de Media Tensión para alimentar la subestación de tracción simple (quedando uno de los dos cables para respaldo en configuración N-1).

Por último, **los dos puntos fundamentales que determinan la inserción de las subestaciones de tracción en 30kV y no en 6kV son la reducción de las pérdidas al alimentar en 30kV y el carácter perturbador de este tipo de suministros** (a pesar de los filtros para atenuar perturbaciones). Según la norma NO-DIS-DI-0002/00 (“INSTALACIONES DE ENLACE EN MEDIA TENSION”) de UTE vigente desde el 1^{ro} de Noviembre de 2008, a la hora de solicitar un suministro el usuario de distribución debe brindar, entre otros datos, información detallada de las cargas perturbadoras en caso de poseerlas. En dicha norma se menciona que se consideran como cargas perturbadoras: Horno de arco, Compresores de potencia relevante, Arranque frecuente de grandes motores, Rectificadores industriales, Soldadura de arco, Procesos industriales con carga variable. Es por este motivo que las subestaciones de tracción, por poseer rectificadores y también por estar asociadas a carga variable (dependiente del flujo de pasajeros), resultan ser cargas del tipo perturbadoras.

Además, existe la experiencia de clientes que en principio piden una tensión de suministro de 6kV y luego, al verificarse que son clientes del tipo perturbador, se les exige pasarse a 30kV. También vale recordar que, a pesar de que aún no se controla la “calidad de onda”, en un futuro cercano se comenzará a controlar la misma.

Capítulo 9: Flujo de Carga

9.1. Software utilizado

La red eléctrica pública cuenta a la fecha con 56 estaciones de transformación 30/6kV. A su vez, cada estación tiene en general 2 o 3 barras, por lo que si se quiere modelar la red de 30kV asimilando cada barra con un nodo, se precisa de un programa de simulación de sistemas eléctricos de potencia que maneje más de 200 barras. Dado que no fue posible conseguir un software que cumpla con dicho requerimiento, se opta por utilizar el software de distribución gratuita PSS®E University Edition versión 33, de la empresa multinacional SIEMENS. Una de las características fundamentales de este software, a efectos de la realización de este proyecto, es que el mismo permite utilizar hasta 50 barras.

Cabe aclarar que, si bien este programa está pensado para estudios de transmisión, puede ser utilizado también para distribución.

9.2. Zona de estudio y modelado de la red

9.2.1. Introducción

A continuación se muestra una imagen de la zona involucrada donde se indica en violeta la ubicación de las estaciones de transformación 30/6kV:

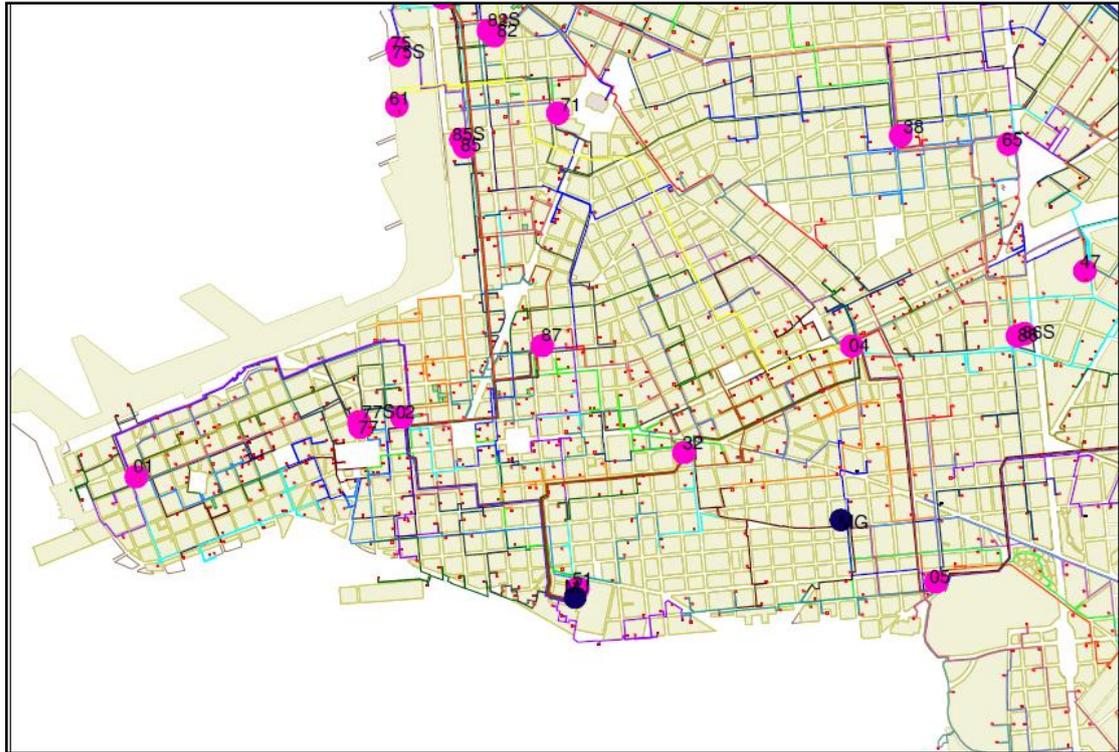


Figura 9.1: Zona de estudio[98]

Por lo tanto, el modelo a utilizar debe tener en cuenta dichas estaciones y, a su vez, las particiones de barras en cada estación, ya que la configuración de los “radiales” de 30kV depende de las mismas.

A partir del diagrama esquemático de estaciones de 30 y 150kV, se llega a que un posible modelo de la zona de estudio es considerar las estaciones de 150/30kV ME, MJ y MF y todas las estaciones 30/6kV que son alimentadas por las primeras. En las Figuras 9.2, 9.3 y 9.4 se presentan los diagramas esquemáticos de las Estaciones ME, MJ y MF respectivamente:

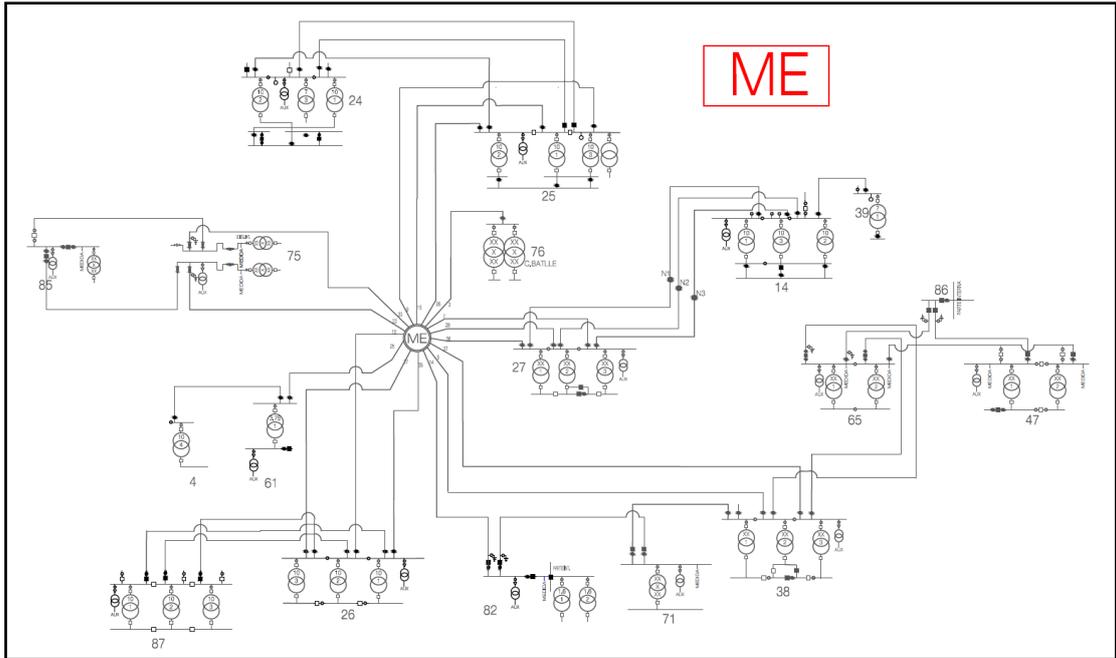


Figura 9.2: Esquemático asociado a ME[98]

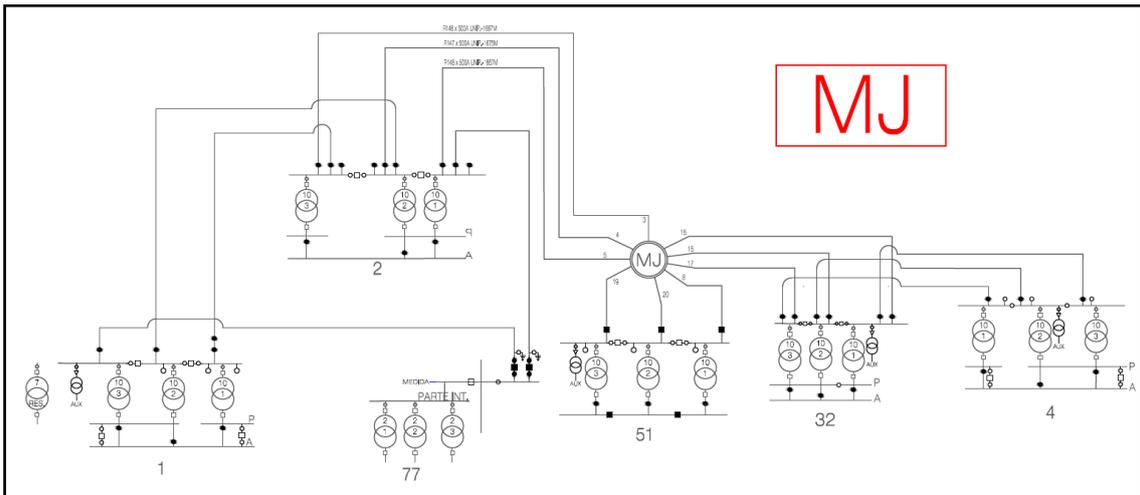


Figura 9.3: Esquemático asociado a MJ[98]

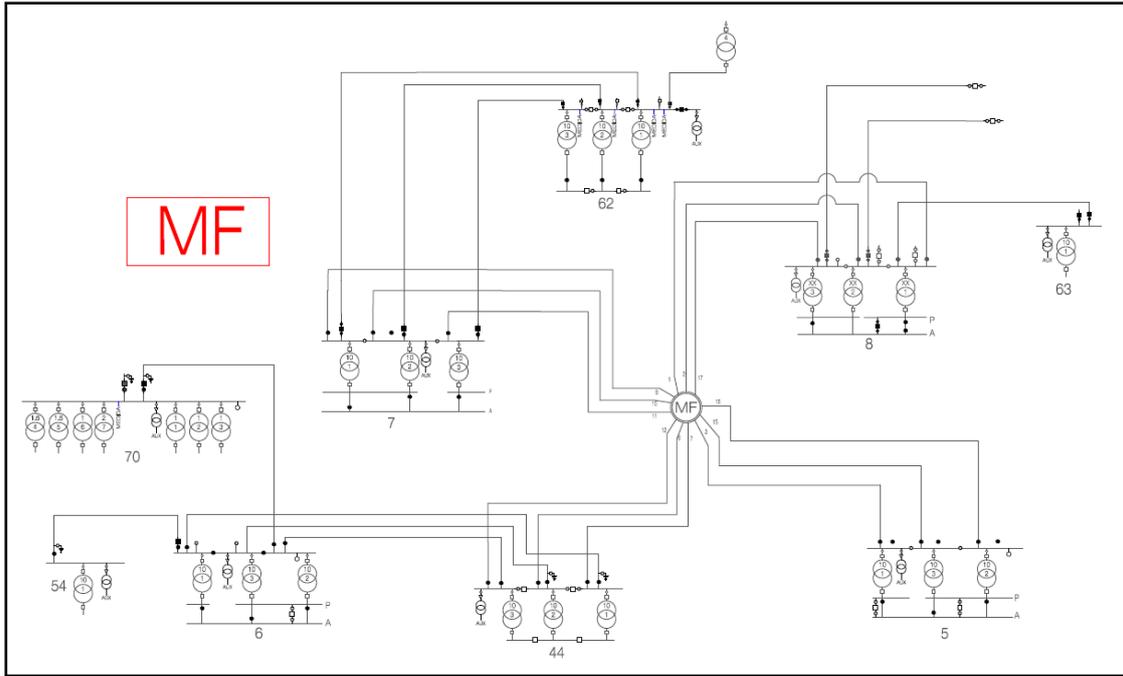


Figura 9.4: Esquemático asociado a MF[98]

9.2.2. Modelado de las líneas

Teniendo en cuenta la zona de estudio en 30kV, se tienen las siguientes líneas:

	ORIGEN	DESTINO	L(km)	CONDUCTOR	Resistencia(Ω /km)	Reactancia(Ω /km)	Corriente nominal(A)	Admitancia($y=b$ en $\mu S/km$)
MF	MF	E07-TR1	1,242	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E07-TR2	1,237	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E07-TR3	1,252	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E07-TR1	E62-TR1	0,919	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E07-TR2	E62-TR2	0,927	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E07-TR3	E62-TR3	0,921	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MF	E44-TR1	2,911	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E44-TR2	3,278	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E44-TR3	3,273	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E44-TR1	E06-TR1	1,956	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E44-TR2	E06-TR3	1,965	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E44-TR3	E06-TR2	1,968	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E06-TR2	E70	1,894	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E08-TR3	2,202	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E08-TR2	2,186	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E08-TR1	2,182	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E08-TR1	E63	1,107	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E08-TR2	E47-TR2	1,596	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E08-TR3	E47-TR1	1,586	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	MF	E05-TR1	4,251	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E05-TR2	4,247	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MF	E05-TR3	4,264	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5

Tabla 9.1: Datos técnicos de las líneas conectadas a MF[98]

	ORIGEN	DESTINO	L(km)	CONDUCTOR	Resistencia	Reactancia	Corriente nominal 1	Admitancia(y=b en μS/km)
ME	ME	E25-TR1	2,821	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E25-TR2	2,786	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E25-TR3	2,792	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E25-TR2	E24-TR2	1,723	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E24-TR1	E24-TR1	1,918	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E25-TR3	E24-TR3	1,736	API 185 C	0,125	0,105999999	328	109,9
	ME	E75	0,561	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E75	E85	0,809	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	ME	E75	0,522	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E75	E85	0,818	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	ME	E61	1,608	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E61	E04	3,238	API 150 C	0,155000001	0,109999999	288	100,5
	ME	E26-TR2	0,303	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	ME	E26-TR1	0,328	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	ME	E26-TR3	0,305	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E26-TR3	E87-TR3	2,256	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E26-TR1	E87-TR1	2,270	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E26-TR2	E87-TR2	2,263	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E76	0,073	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	ME	E27-TR1	1,739	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E27-TR2	1,732	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E27-TR3	1,715	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E27-TR1	N1	4,058	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E27-TR2	N2	4,533	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E27-TR3	N3	4,541	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	N1	E14-TR1	4,011	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	N2	E14-TR2	4,437	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	N3	E14-TR3	4,444	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E14-TR2	E39	2,090	API 50 C	0,479000002	0,131999999	154	69,1
	ME	E38-TR3	3,071	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E38-TR2	2,895	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	ME	E82	0,843	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E82	E71	1,002	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E71	E38-TR1	2,171	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E38-TR2	E65-TR1	0,624	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E38-TR3	E65-TR2	0,651	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E65-TR1	E86	1,317	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E65-TR2	E47-TR2	1,661	XLPE 240 A	0,160999998	0,112999998	415	99,9
	E47-TR1	E86	0,959	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5

Tabla 9.2: Datos técnicos de las líneas conectadas a ME[98]

	ORIGEN	DESTINO	L(km)	CONDUCTOR	Resistencia	Reactancia	Corriente nominal 1	Admitancia(y=b en μS/km)
MJ	MJ	E02-TR3	1,687	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MJ	E02-TR2	1,675	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MJ	E02-TR1	1,667	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	E77	E01-TR3	1,837	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E02-TR2	E01-TR2	2,280	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E02-TR3	E01-TR1	2,258	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	MJ	E51-TR3	0,029	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MJ	E51-TR2	0,027	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MJ	E51-TR1	0,026	XLPE 500 A	0,083999999	0,101999998	590	96,1
	MJ	E32-TR3	1,401	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MJ	E32-TR2	1,392	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	MJ	E32-TR1	1,385	API 240 C	0,095899999	0,101999998	378	122,5
	E32-TR1	E04-TR3	1,205	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E32-TR2	E04-TR2	1,196	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E32-TR3	E04-TR1	1,187	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2
	E77	N4	0,381	XLPE 240 A	0,160999998	0,112999998	415	99,9
	N4	E02-TR1	0,789	API 120 C	0,189999998	0,112999998	258	94,2

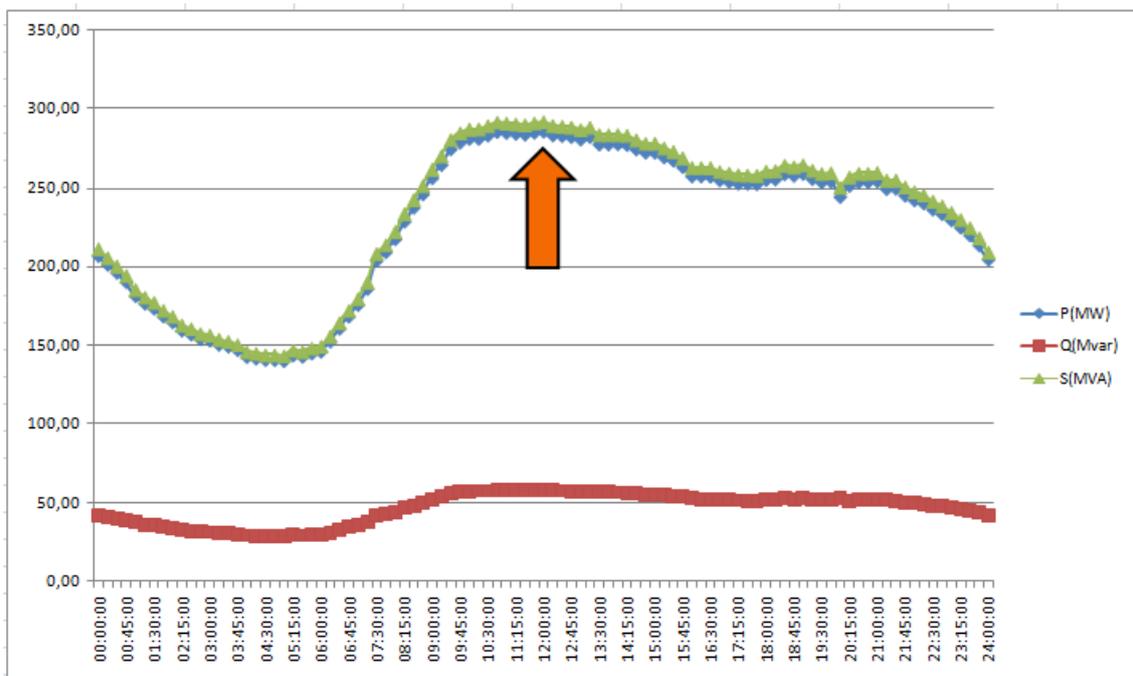
Tabla 9.3: Datos técnicos de las líneas conectadas a MJ[98]

Se observa que la línea más larga es el cable que conecta la barra donde está el transformador 3 de la Estación 27 con la barra donde está el transformador 3 de la Estación 14, la cual mide aproximadamente 9km. Por lo tanto, se decide representar la red en estudio despreciando las admitancias de los cables (constituidas fundamentalmente por una capacidad), de modo de simplificar el análisis. De esta forma, el modelo equivalente de las líneas es una impedancia de la forma: $Z=R+j\cdot X$.

Para el diseño de los nuevos tendidos en 30kV se utilizan cables de Media Tensión XLPE 500A, ya que son con los que actualmente diseña UTE. Dichos cables admiten una corriente de 590A, es decir, a tensión nominal de 31,5kV admiten una potencia de $S=\sqrt{3}\cdot U\cdot I=\sqrt{3}\cdot 31,5\cdot 590=32,19\text{MVA}$. [98]

9.2.3. Modelado de las cargas

Para modelar las cargas en cada barra, se considera que las mismas consumen en forma constante la medida de carga en cada salida de cada estación para el día de máximo consumo de potencia a nivel nacional, el cual resultó ser el 25 de Julio. En la Gráfica 9.1 se presenta la curva de carga en la zona de estudio para el día Jueves 25 de Julio de 2012:



Gráfica 9.1: Curva de carga en la zona de estudio

Analizando los valores obtenidos en la Gráfica 9.1 se observa que por ser una zona de tipo comercial, el máximo de potencia se da cercano al mediodía, a diferencia de las zonas de tipo residencial donde el mismo se da cercano a las 20:00hs.

Para determinar el escenario base para el diseño del sistema de alimentación de los tranvías se considera potencia constante en cada barra a la hora del máximo (en este caso, a las 12:00hs) como se muestra en la tabla 9.4. De este modo, nos encontramos en el peor escenario posible desde el punto de vista de la carga.

Máximo (Hora 12:00)			Máximo (Hora 12:00)		
BARRA	P(MW)	Q(Mvar)	BARRA	P(MW)	Q(Mvar)
E01-TR1	5,67	1,15	E27-TR3	6,47	1,31
E01-TR2	6,22	1,26	E32-TR1	9,23	1,87
E01-TR3	4,55	0,92	E32-TR2	4,67	0,95
E02-TR1	8,38	1,70	E32-TR3	9,20	1,87
E02-TR2	4,01	0,82	E38-TR1	5,37	1,09
E02-TR3	6,32	1,28	E38-TR2	5,86	1,19
E04-TR1	5,43	1,10	E38-TR3	4,42	0,90
E04-TR2	7,42	1,51	E39	0,13	0,03
E04-TR3	5,76	1,17	E44-TR1	3,94	0,80
E05-TR1	2,89	0,59	E44-TR2	3,87	0,79
E05-TR2	0,96	0,20	E44-TR3	4,80	0,97
E06-TR1	2,56	0,52	E47-TR1	1,44	0,29
E06-TR2	0,80	0,16	E47-TR2	2,18	0,44
E06-TR3	1,03	0,21	E51-TR1	6,03	1,23
E07-TR1	3,41	0,69	E51-TR2	3,84	0,78
E07-TR2	4,62	0,94	E51-TR3	0,00	0,00
E07-TR3	6,30	1,28	E61	0,51	0,10
E08-TR1	4,01	0,81	E62-TR1	3,87	0,79
E08-TR2	4,97	1,01	E62-TR2	3,81	0,77
E08-TR3	4,33	0,88	E62-TR3	3,43	0,70
E14-TR1	4,00	0,81	E63	4,34	0,88
E14-TR2	3,69	0,75	E65-TR1	2,80	0,57
E14-TR3	4,65	0,95	E65-TR2	2,88	0,59
E24-TR1	5,87	1,19	E70	5,47	1,11
E24-TR2	4,55	0,92	E71	4,01	0,81
E24-TR3	4,10	0,83	E75	3,46	0,70
E25-TR1	2,89	0,59	E77	0,99	0,20
E25-TR2	6,35	1,29	E82	3,56	0,72
E25-TR3	4,11	0,84	E85	1,54	0,31
E26-TR1	5,65	1,15	E86	1,11	0,23
E26-TR2	5,57	1,13	E87-TR1	5,51	1,12
E26-TR3	3,95	0,80	E87-TR2	5,65	1,15
E27-TR1	6,55	1,33	E87-TR3	4,28	0,87
E27-TR2	5,36	1,09			

Tabla 9.4: Potencias Activa y Reactiva asociadas a cada barra [98]

Cabe aclarar que, a efecto de simplificar el modelo, no se consideran las pérdidas de potencia en los transformadores de las estaciones.

En la Tabla 9.5 se muestra la potencia en cada barra de las estaciones de la zona en estudio a la hora del máximo:

Máximo (Hora 12:00)			Máximo (Hora 12:00)			Máximo (Hora 12:00)		
BARRA	P(MW)	Q(Mvar)	BARRA	P(MW)	Q(Mvar)	BARRA	P(MW)	Q(Mvar)
E01-TR1	5,67	1,15	E24-TR1	5,87	1,19	E47-TR2	2,18	0,44
E01-TR2	6,22	1,26	E24-TR2	4,55	0,92	E51-TR1	6,03	1,23
E01-TR3	4,55	0,92	E24-TR3	4,10	0,83	E51-TR2	3,84	0,78
E02-TR1	8,38	1,70	E25-TR1	2,89	0,59	E51-TR3	0,00	0,00
E02-TR2	4,01	0,82	E25-TR2	6,35	1,29	E61	0,51	0,10
E02-TR3	6,32	1,28	E25-TR3	4,11	0,84	E62-TR1	3,87	0,79
E04-TR1	5,43	1,10	E26-TR1	5,65	1,15	E62-TR2	3,81	0,77
E04-TR2	7,42	1,51	E26-TR2	5,57	1,13	E62-TR3	3,43	0,70
E04-TR3	5,76	1,17	E26-TR3	3,95	0,80	E63	4,34	0,88
E05-TR1	2,89	0,59	E27-TR1	6,55	1,33	E65-TR1	2,80	0,57
E05-TR2	0,96	0,20	E27-TR2	5,36	1,09	E65-TR2	2,88	0,59
E06-TR1	2,56	0,52	E27-TR3	6,47	1,31	E70	5,47	1,11
E06-TR2	0,80	0,16	E32-TR1	9,23	1,87	E71	4,01	0,81
E06-TR3	1,03	0,21	E32-TR2	4,67	0,95	E75	3,46	0,70
E07-TR1	3,41	0,69	E32-TR3	9,20	1,87	E77	0,99	0,20
E07-TR2	4,62	0,94	E38-TR1	5,37	1,09	E82	3,56	0,72
E07-TR3	6,30	1,28	E38-TR2	5,86	1,19	E85	1,54	0,31
E08-TR1	4,01	0,81	E38-TR3	4,42	0,90	E86	1,11	0,23
E08-TR2	4,97	1,01	E39	0,13	0,03	E87-TR1	5,51	1,12
E08-TR3	4,33	0,88	E44-TR1	3,94	0,80	E87-TR2	5,65	1,15
E14-TR1	4,00	0,81	E44-TR2	3,87	0,79	E87-TR3	4,28	0,87
E14-TR2	3,69	0,75	E44-TR3	4,80	0,97			
E14-TR3	4,65	0,95	E47-TR1	1,44	0,29			

Tabla 9.5: Potencias Activa y Reactiva en cada barra de las estaciones de la zona de estudio[98]

Para el modelado de las subestaciones de tracción, se considera que las mismas consumen, en todo momento, $P=2,5\text{MW}$ y $Q=0\text{kVAr}$ ya que las unidades tranviarias son alimentadas en DC, y dado que la potencia de los mismos es mucho mayor que la de los servicios auxiliares de las subestaciones, se considera factor de potencia unitario.

9.2.4. Modelado de generadores

Se considera a las barras de 150/30kV como generadores de potencia infinita. Para cada archivo de flujo de carga se tiene una única barra generadora correspondiente a la barra que representa a ME, MJ o MF, es decir, estas barras actúan siempre como barra “slack”. También se asume que la tensión en la barra “slack” es igual a la tensión nominal, 31,5kV.

9.3. Flujos de carga

9.3.1. Estado actual de la zona de estudio

Para saber el estado de carga que tienen actualmente las líneas conectadas a cada estación de 30kV, se corre un flujo de cargas por cada una de las subredes asociadas a las Estaciones de Transformación 150/30kV consideradas (ME, MF y MJ). En la Tabla 9.6 se muestran los resultados obtenidos:

	ORIGEN	DESTINO	I/In (%)	
MF	MF	E07-TR1	36	
	MF	E07-TR2	42	
	MF	E07-TR3	48	
	E07-TR1	E62-TR1	12	
	E07-TR2	E62-TR2	12	
	E07-TR3	E62-TR3	11	
	MF	E44-TR1	32	
	MF	E44-TR2	24	
	MF	E44-TR3	55	
	E44-TR1	E06-TR1	13	
	E44-TR2	E06-TR3	5	
	E44-TR3	E06-TR2	31	
	E06-TR2	E70	27	
	MF	E08-TR3	21	
	MF	E08-TR2	25	
	MF	E08-TR1	41	
	E08-TR1	E63	32	
	E08-TR2	E47-TR2	-----	
	E08-TR3	E47-TR1	-----	
	MF	E05-TR1	14	
	MF	E05-TR2	5	
	MF	E05-TR3	-----	
	MJ	MJ	E02-TR3	38
		MJ	E02-TR2	33
		MJ	E02-TR1	44
		E77	E01-TR3	33
		E02-TR2	E01-TR2	45
		E02-TR3	E01-TR1	41
MJ		E51-TR3	-----	
MJ		E51-TR2	12	
MJ		E51-TR1	19	
MJ		E32-TR3	73	
MJ		E32-TR2	60	
MJ		E32-TR1	74	
E32-TR1		E04-TR3	42	
E32-TR2		E04-TR2	54	
E32-TR3		E04-TR1	39	
E02-TR1		N4	40	
N4		E77	25	

	ORIGEN	DESTINO	I/In (%)
ME	ME	E25-TR1	52
	ME	E25-TR2	70
	ME	E25-TR3	48
	E25-TR2	E24-TR2	31
	E25-TR1	E24-TR1	34
	E25-TR3	E24-TR3	32
	ME	E75-B	28
	E75-B	E85	5
	ME	E75-C	-----
	E75-C	E85	-----
	ME	E61	3
	E61	E04-BR4	-----
	ME	E26-TR2	40
	ME	E26-TR1	41
	ME	E26-TR3	30
	E26-TR3	E87-TR3	25
	E26-TR1	E87-TR1	31
	E26-TR2	E87-TR2	39
	ME	E76	-----
	ME	E27-TR1	60
	ME	E27-TR2	57
	ME	E27-TR3	71
	E27-TR1	N1	26
	E27-TR2	N2	26
	E27-TR3	N3	27
	N1	E14-TR1	38
	N2	E14-TR2	39
	N3	E14-TR3	40
	E14-TR2	E39	3
	ME	E38-TR3	53
	ME	E38-TR2	66
	ME	E82	67
E82	E71	48	
E71	E38-TR1	23	
E38-TR2	E65-TR1	30	
E38-TR3	E65-TR2	31	
E65-TR1	E86	15	
E65-TR2	E47-TR2	16	
E47-TR1	E86	9	

Tabla 9.6: Estado actual de carga de las líneas de 30kV

9.3.2. Elección de los puntos de inserción de las subestaciones de tracción

Para determinar el lugar exacto de inserción de las subestaciones de tracción en la red de 30kV, se comienza por ubicarlas. Estas ubicaciones fueron elegidas de acuerdo a varios criterios, como por ejemplo, que exista suficiente espacio físico, que se encuentren a determinada distancia relativa al trayecto y respecto del resto de las subestaciones, viabilidad económica, etc. En la Figura 9.5 se muestran las ubicaciones de las cincosubestaciones de tracción junto con los cables de Media Tensión en 30kV aledaños a las mismas:

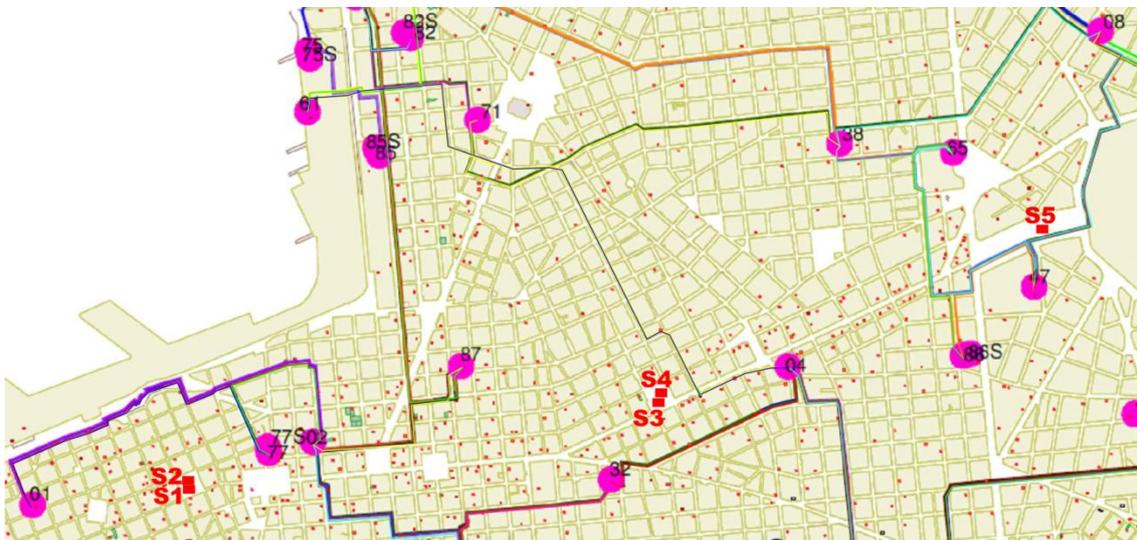


Figura 9.5: Red de 30kV y ubicación de las SSEE de tracción[98]

El hecho de haber situado a las subestaciones S1 y S2 (al igual que S3 y S4) en una misma ubicación, se debe a un criterio exclusivamente económico, debido a que de esta forma el distribuidor de energía eléctrica (UTE) solamente necesita instalar un Puesto de Conexión y Medida (de aquí en adelante PCyM) para ambas subestaciones. A su vez, debido a la falta de espacio disponible en la ciudad, las mismas se ubicaron en espacios públicos (más precisamente en plazas públicas), de modo que no se deba expropiar ninguna edificación aledaña.

Por tanto, queda claro que habrá dos tipos de configuraciones posibles asociadas a los PCyM: una doble o compartida (Figura 9.6) y otra simple o individual (Figura 9.7).

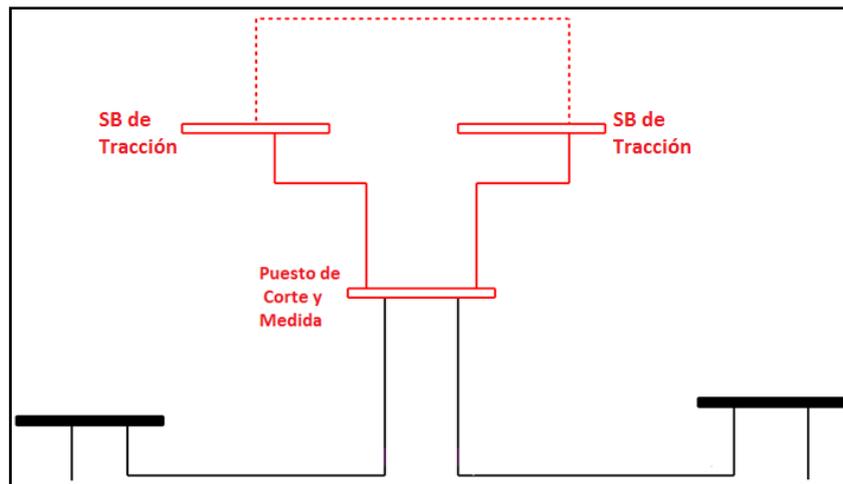


Figura 9.6: Puesto de Conexión y Medida doble o compartido

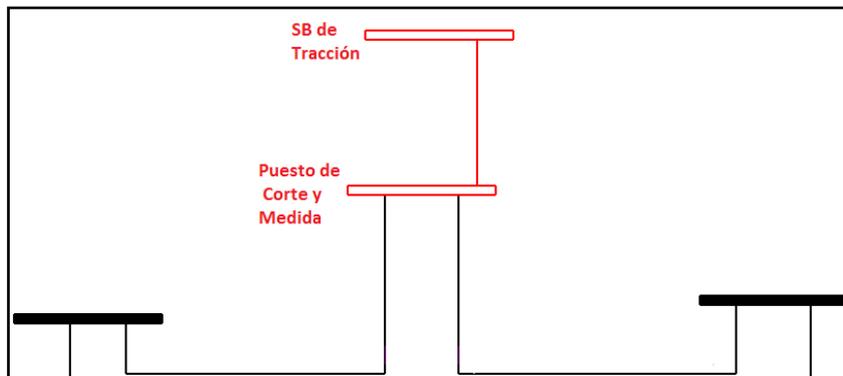


Figura 9.7: Puesto de Conexión y Medida simple o individual

Cabe aclarar que estos puestos estarán situados muy cerca de las subestaciones del tranvía, por lo que determinar los lugares de inserción de las mismas en cierta forma equivale a determinar en dónde se conectarán los Puestos de Conexión y Medida.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para determinar la mejor opción de conexión con la red de 30kV para cada caso.

9.3.2.1. Inserción de las subestaciones 1 y 2

Como se observa en las Figuras 9.8 y 9.9, en principio existen 5 posibilidades de conexión:

1. P1 – Entre E1-TR2 y E2-TR2, cerca del Punto A
2. P2 – Entre E1-TR1 y E2-TR3, cerca del Punto A
3. P3 – Entre E1-TR3 y E77, cerca del Punto A
4. P4 – Entre E1-TR3 y E77, cerca del Punto B
5. P5 – Entre E2-TR1 y E77, cerca del Punto B



Figura 9.8: Mapa de ubicación de las subestaciones 1 y 2[98]

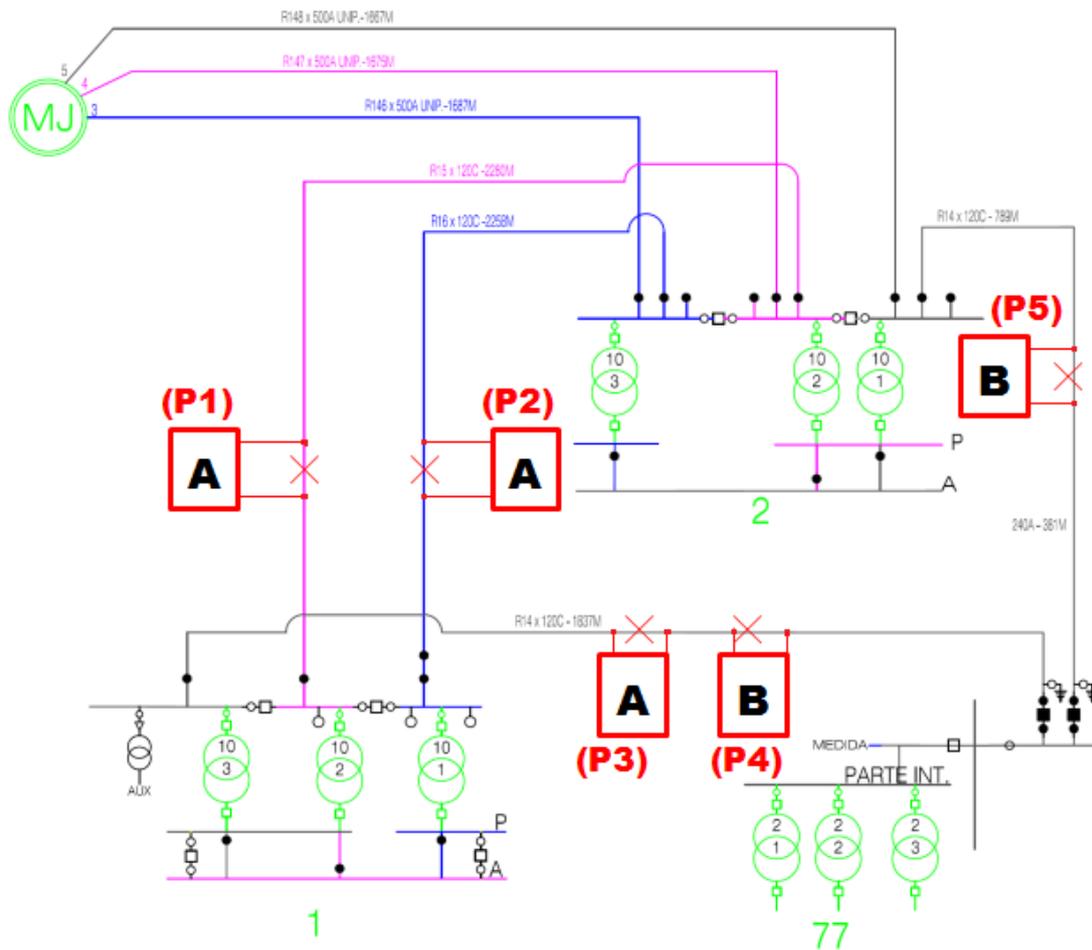


Figura 9.9: Esquemático de referencia para determinar la inserción de las SSEE 1 y 2 (Elaboración propia a partir de esquemático suministrado por UTE)

Considerando el resultado del flujo de carga de la red de 30kV en la zona de estudio respecto a la carga de los cables de Media Tensión (Tabla 9.5), se tiene que:

- el cable de MT correspondiente a P1 actualmente presenta un 45% de carga
- el cable de MT correspondiente a P2 actualmente presenta un 41% de carga
- el cable de MT correspondiente a P3 y P4 actualmente presenta un **33%** de carga
- el cable de MT correspondiente a P5 actualmente presenta un 40% de carga

Por lo tanto, de los porcentajes anteriormente mencionados se desprende que el PCyM-01 de las subestaciones 1 y 2 se ubicará entre E1-TR3 y E77, es decir, cerca del Punto A (P3) o cerca del Punto B (P4). Considerando que de elegir la ubicación cerca del Punto B se estarían ahorrando aproximadamente 260m de cable de MT de 30kV,

finalmente se opta por dicha opción. En la Figura 9.10 se presenta la carga del cable de MT donde se intercaló el PCyM-01 luego de haber corrido un flujo de cargas.

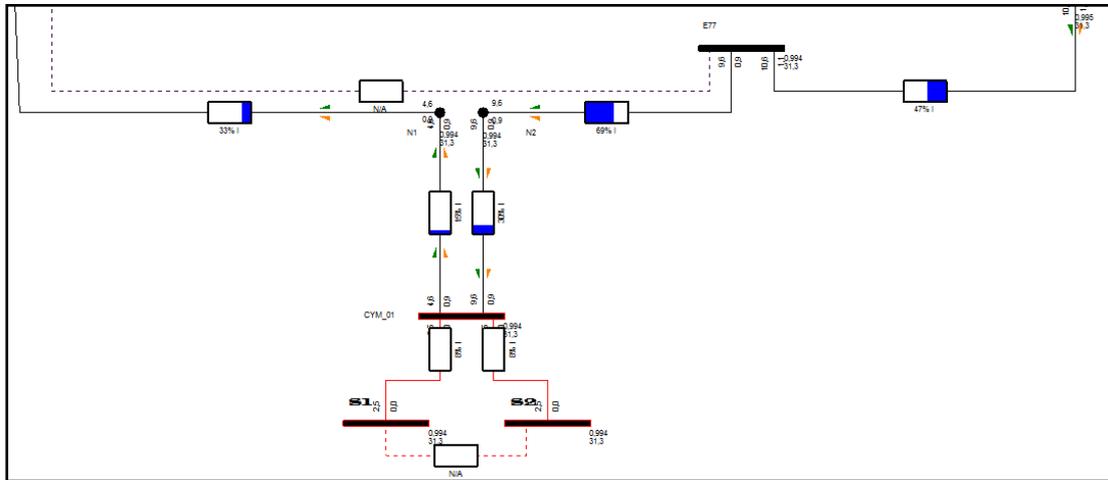


Figura 9.10: Flujo de carga luego de insertar las subestaciones 1 y 2 (Elaboración propia utilizando PSS®E University Edition versión 33)

A continuación se presenta una tabla comparativa con la carga en los cables de MT del radial (asociado a la inserción) antes y después de la misma:

Origen	Destino	ANTES	DESPUES
MJ	E02-TR1	44	60
E02-TR1	N4	40	76
N4	E77	25	47
E77	E01-TR3	33	-----
E77	N2	-----	69
N2	CYM - 01	-----	30
CYM - 01	N1	-----	15
N1	E01-TR3	-----	33

Tabla 9.7: Carga de los cables de MT antes y después de insertar las SSEE 1 y 2

9.3.2.2. Inserción de las subestaciones 3 y 4

En la Figura 9.11 se puede observar un esquema de los radiales que terminan en la Estación 04, así como también la ubicación de las subestaciones 3 y 4. Observar que intercalar las SSEE 3 y 4 entre la Estación 61 y la Estación 04, si bien puede parecer económicamente más conveniente ya que el punto de inserción está casi 100m más cerca respecto al punto de inserción entre la Estación 04 y la 32, es energéticamente ineficiente dado que, al realizar este tipo de inserción, la potencia necesaria para alimentar las subestaciones de tracción se trae desde una estación que se encuentra mucho más alejada, con lo cual las pérdidas resultan ser mayores. Es por esta razón que se decide intercalar el PCyM-02 entre la Estación 04 y la 32.

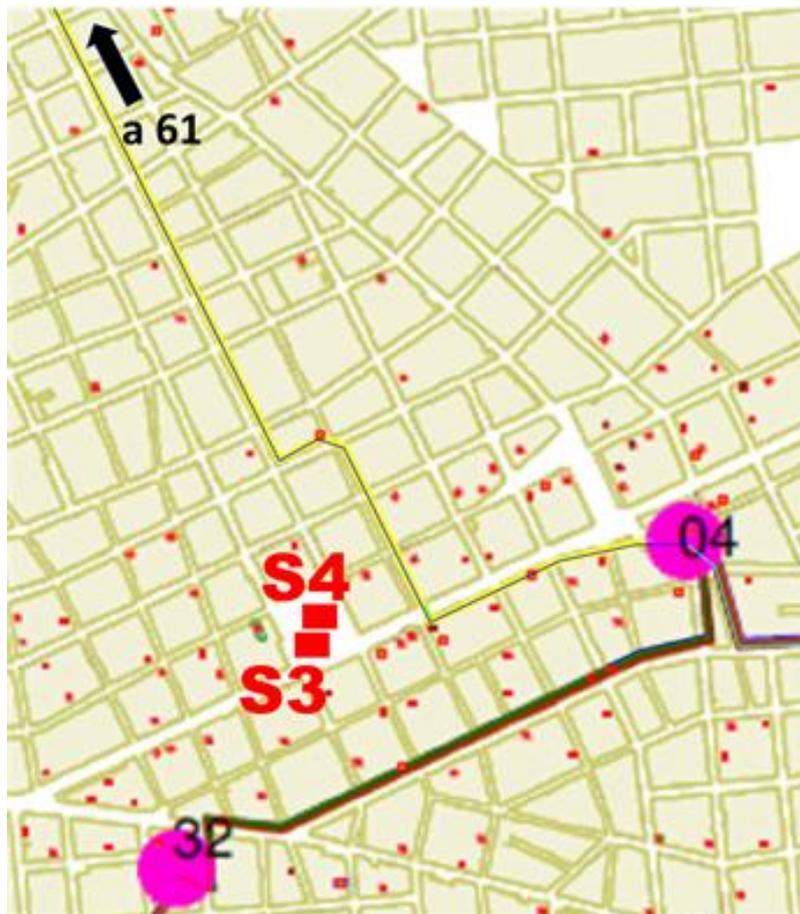


Figura 9.11: Mapa de ubicación de las subestaciones 3 y 4[98]

En la Figura 9.12 se presenta un esquema de interconexión de las estaciones 04, 32 y MJ:

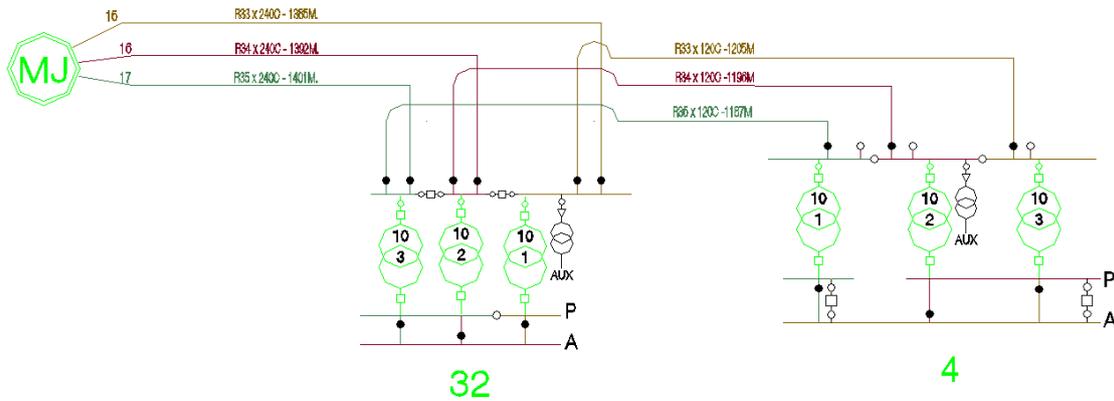


Figura 9.12: Esquema de interconexión de las estaciones 04, 32 y MJ[98]

Para ver en cuál de los tres cables se intercala el PCyM-02, se considera el resultado del flujo de carga de la zona de estudio, el cual se muestra en la Figura 9.13:

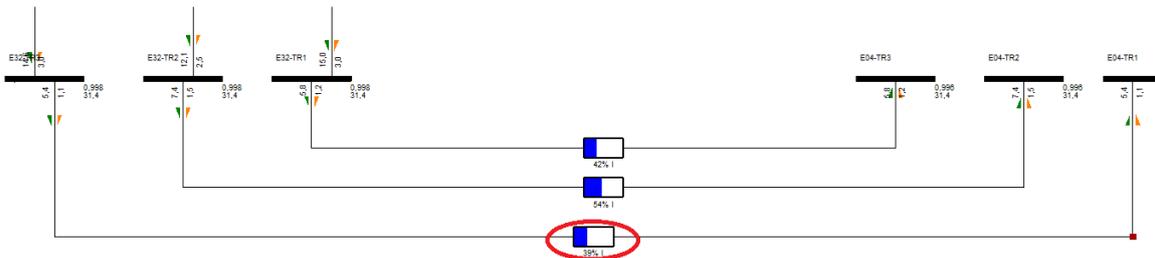


Figura 9.13: Flujo de carga antes de insertar las subestaciones 3 y 4 (Elaboración propia utilizando PSS®E University Edition versión 33)

Se desprende de la Figura 9.13 que la terna entre E32-TR3 y E04-TR1 es la menos cargada. Por lo tanto, se decide intercalar el PCyM-02 en dicho tramo. En la Figura 9.14 se muestra el esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-02:

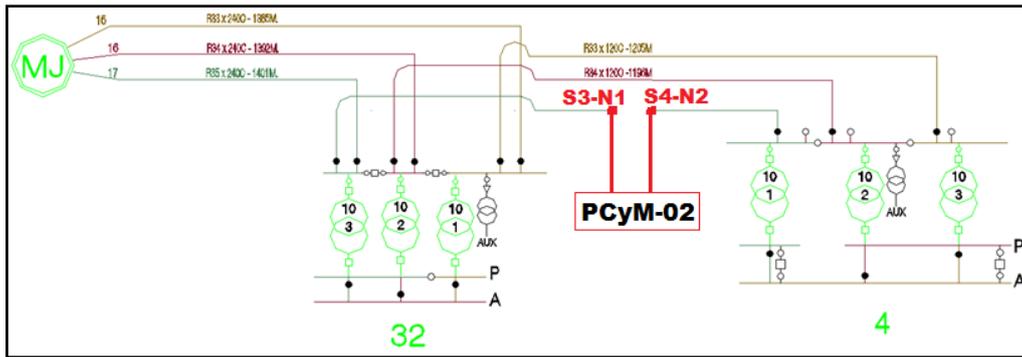


Figura 9.14: Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-02 (Elaboración propia a partir de esquemático suministrado por UTE)

A continuación se presenta una figura con la carga del cable de MT donde se intercaló el PCyM-02 luego de haber corrido un flujo de cargas y una tabla comparativa con la carga en los cables de MT del radial (asociado a la inserción) antes y después de la misma:

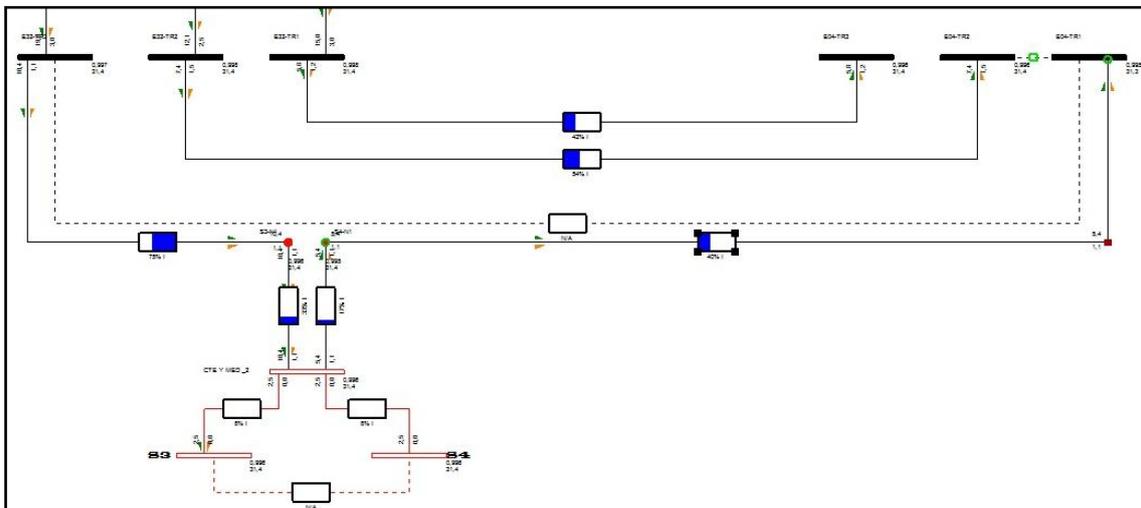


Figura 9.15: Flujo de carga luego de insertar las subestaciones 3 y 4 (Elaboración propia utilizando PSS®E University Edition versión 33)

Origen	Destino	ANTES	DESPUES
MJ	E32-TR3	73	97
E32-TR3	E04-TR1	39	-----
E32-TR3	S3-N1	-----	75
S3-N1	CYM - 02	-----	33
CYM - 02	S4-N1	-----	17
S4-N1	E04-TR1	-----	40

Tabla 9.8: Carga de los cables de MT antes y después de insertar las SSEE 3 y 4

9.3.2.3. Inserción de la subestación 5

Como los dos radiales que vienen desde la Estación 08 hacia la Estación 47 están abiertos en las barras de esta última, se decide insertar el PCyM-03 (correspondiente a la SSEE 5) entre la Estación 47 y la 86 o bien entre la 47 y la 65.

En la Figura 9.16 se presenta un mapa de ubicación de la subestación de tracción 5:



Figura 9.16: Mapa de ubicación de la subestación 5[98]

En la Figura 9.17 se presenta un esquema de interconexión de las estaciones 86, 65, 47 y ME:

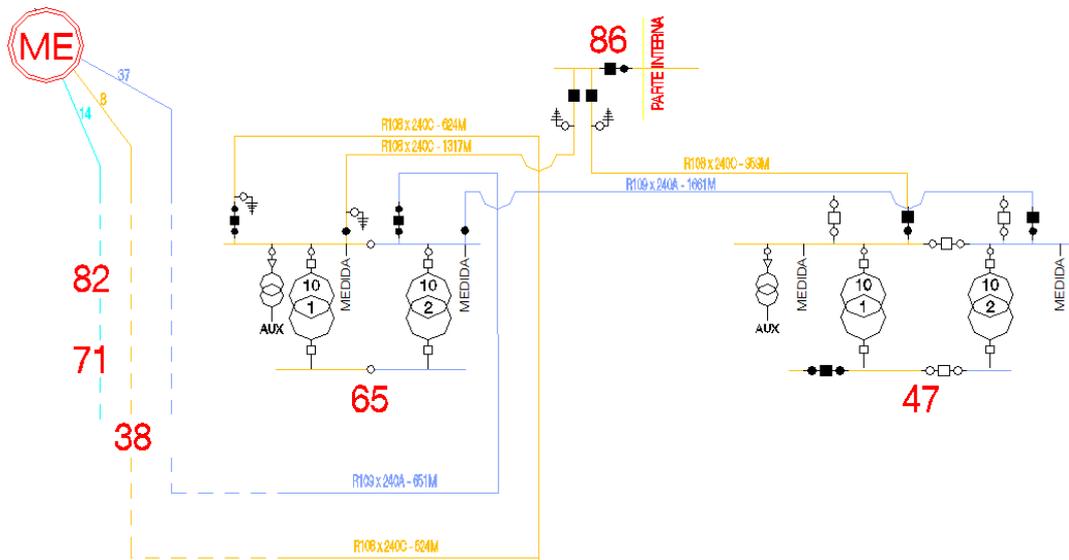


Figura 9.17: Esquema de interconexión de las estaciones 86, 65, 47 y ME[98]

Para ver en cuál de los 3 cables se intercala el PCyM-03, se considera el resultado del flujo de carga de la zona de estudio, el cual se muestra en la Figura 9.18:

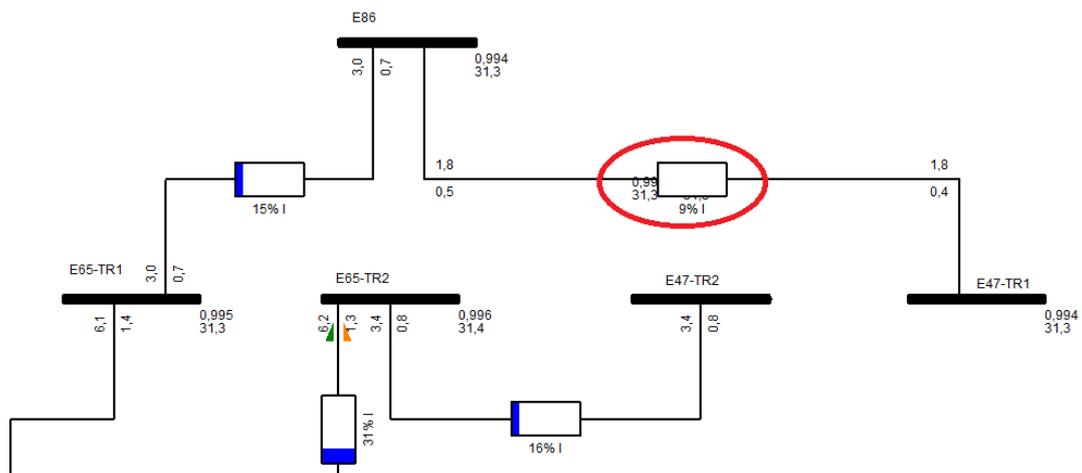


Figura 9.18: Flujo de carga antes de insertar la subestación 5 (Elaboración propia utilizando PSS®E University Edition versión 33)

Se desprende de la Figura 9.18 que la terna entre E86 y E47-TR1 es la menos cargada. Por lo tanto, se decide intercalar el PCyM-03 en dicho tramo. En la Figura 9.19 se muestra el esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-03:

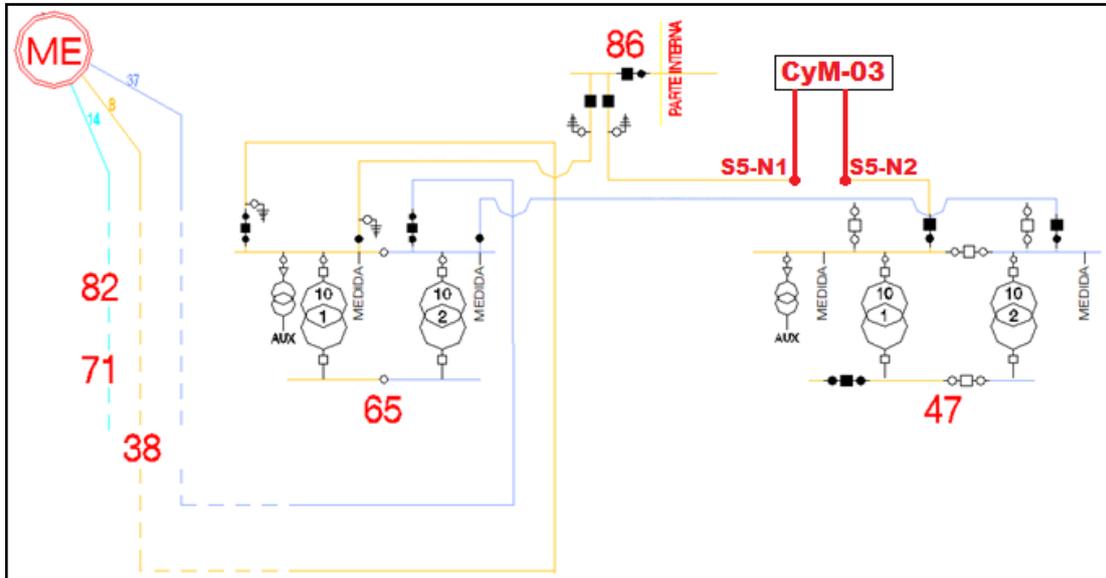


Figura 9.19: Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-03 (Elaboración propia a partir de esquemático suministrado por UTE)

A continuación se presenta una figura con la carga del cable de MT donde se intercaló el PCyM-03 luego de haber corrido un flujo de cargas y una tabla comparativa con la carga en los cables de MT del radial (asociado a la inserción) antes y después de la misma:

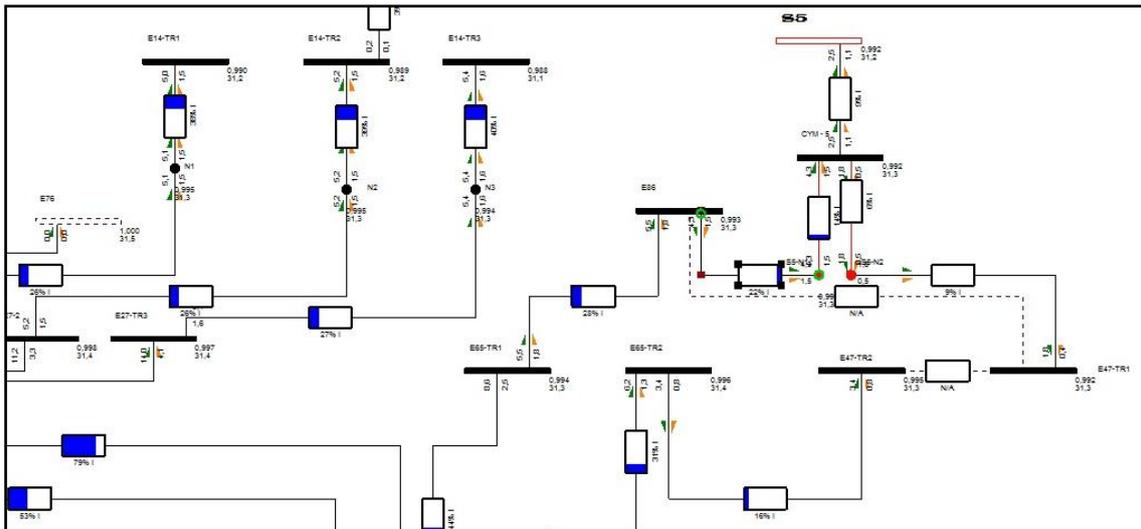


Figura 9.20: Flujo de carga luego de insertar la subestación 5(Elaboración propia utilizando PSS@E University Edition versión 33)

Origen	Destino	ANTES	DESPUES
MJ	E38-TR2	66	79
E38-TR2	E65-TR1	30	44
E65-TR1	E86	15	28
E86	E47-TR1	9	-----
E86	S5-N1	-----	22
S5-N1	CYM-03	-----	14
CYM-03	S5-N2	-----	6
S5-N2	E47-TR1	-----	9

Tabla 9.9: Carga de los cables de MT antes y después de insertar la SSEE 5

9.3.3. Análisis de contingencias - configuración N-1.

La aplicación del *criterio N-1* consiste en la simulación de la pérdida de un componente de la red (cable, transformador o generador). En nuestro caso, con el fin de simplificar el análisis, solo consideraremos el caso de falla en los cables. A su vez, en caso de una falta, es poco probable que una salida se encuentre consumiendo el 100% de la carga, por lo que surge el concepto de *carga probabilizada*, que supone el valor de la carga considerada multiplicada por un factor menor o igual a 1.

9.3.3.1. Falla alimentación N de PCyM-01

Como se puede ver en la Figura 9.21, el Puesto de Conexión y Medida PCyM-01 se alimenta normalmente del radial MJ/E02-TR1/E77/E01-TR3.

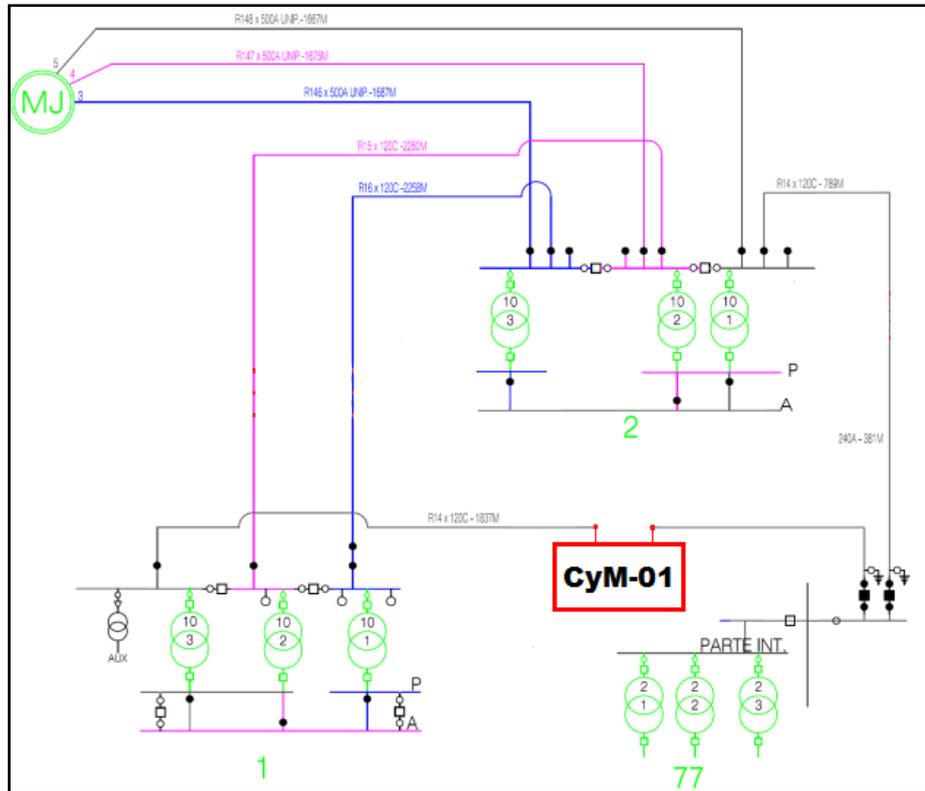


Figura 9.21: Esquema de interconexión luego de insertar el PCyM-01 (Elaboración propia a partir de esquemático suministrado por UTE)

Ante un fallo en dicho radial, se da respaldo al PCyM-01 cerrando el acople de barras que normalmente separa E01-TR3 y E01-TR2 en la Estación 01. A continuación se presentan cinco tablas de resultados donde se utilizan varios factores de carga probabilizada para estudiar los casos de contingencia N-1:

		Carga - I/In(%)								
fp=1	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	62	39	70	30	46	105	185	94
	Falla cable entre E02-TR1 y E77	27	-----	-----	7	3	19	43	122	66
	Falla cable entre E77 y CyM-01	30	7	4	-----	-----	16	36	114	63
	Falla cable entre CyM-01 y E01-TR3	45	42	26	35	16	-----	-----	79	47
	Falla cable entre E01-TR2 y E02-TR2	80	122	76	114	50	35	79	-----	13
	Falla cable entre E02-TR2 y MJ	93	151	94	144	63	48	109	30	-----

Tabla 9.10: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=1 – PCyM-01

		Carga - I/In(%)								
fp=0,9	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	56	35	62	27	41	95	166	84
	Falla cable entre E02-TR1 y E77	24	-----	-----	7	3	17	39	109	59
	Falla cable entre E77 y CyM-01	27	6	4	-----	-----	14	32	103	56
	Falla cable entre CyM-01 y E01-TR3	41	38	24	32	14	-----	-----	71	42
	Falla cable entre E01-TR2 y E02-TR2	72	109	68	103	45	31	71	-----	11
	Falla cable entre E02-TR2 y MJ	84	136	85	130	57	43	98	27	-----

Tabla 9.11: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,9 – PCyM-01

		Carga - I/In(%)								
fp=0,8	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	50	31	55	24	37	84	147	75
	Falla cable entre E02-TR1 y E77	21	-----	-----	6	3	15	34	97	53
	Falla cable entre E77 y CyM-01	24	6	4	-----	-----	13	29	91	50
	Falla cable entre CyM-01 y E01-TR3	36	34	21	28	12	-----	-----	63	38
	Falla cable entre E01-TR2 y E02-TR2	64	97	60	91	40	28	63	-----	10
	Falla cable entre E02-TR2 y MJ	74	121	75	115	50	38	87	24	-----

Tabla 9.12: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,8 – PCyM-01

		Carga - I/In(%)									
fp=0,7	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ	
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	43	27	48	21	32	73	128	65	
	Falla cable entre E02-TR1 y E77	19	-----	-----	5	2	13	30	85	46	
	Falla cable entre E77 y CyM-01	21	5	3	-----	-----	11	25	80	44	
	Falla cable entre CyM-01 y E01-TR3	32	30	19	25	11	-----	-----	55	33	
	Falla cable entre E01-TR2 y E02-TR2	56	85	53	80	35	24	55	-----	9	
	Falla cable entre E02-TR2 y MJ	65	105	66	100	44	33	76	21	-----	

Tabla 9.13: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,7 – PCyM-01

		Carga - I/In(%)									
fp=0,65	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ	
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	40	25	45	20	30	68	119	60	
	Falla cable entre E02-TR1 y E77	17	-----	-----	5	2	12	28	79	43	
	Falla cable entre E77 y CyM-01	19	5	3	-----	-----	10	23	74	41	
	Falla cable entre CyM-01 y E01-TR3	29	28	17	23	10	-----	-----	51	31	
	Falla cable entre E01-TR2 y E02-TR2	52	79	49	74	32	22	51	-----	8	
	Falla cable entre E02-TR2 y MJ	60	98	61	93	41	31	70	19	-----	

Tabla 9.14: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,65 – PCyM-01

Tal como se observa en las Tablas 9.10 a 9.14, el caso de que falle el tramo entre MJ y E02-TR1 es crítico con respecto a la sobrecarga en el tramo que va desde E01-TR2 y E02-TR2. Es por eso que se decide estudiar el respaldo cerrando el acople de barras en la E02 (E02-TR2 y E02-TR1) en vez de cerrar el acople en E01. Al correr un flujo de cargas con factor de carga probabilizada unitario, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9.15:

		Carga - I/In(%)									
fp=1	Falla	MJ/E02-TR1	N4/E02-TR1	E77/N4	N2/E77	CyM-01/N2	N1/CyM-01	E01-TR3/N1	E01-TR2/E02-TR2	E02-TR2/MJ	
	Falla cable entre MJ y E02-TR1	-----	76	47	69	30	15	33	45	92	

Tabla 9.15: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=1 – Respaldo en E02

Se concluye que la alternativa natural ante una falla entre MJ y E02-TR1 es cerrar el acople de barras entre E02-TR2 y E02-TR1.

9.3.3.2. Falla alimentación N de PCyM-02

Como se muestra en la Figura 9.14, el Puesto de Conexión y Medida PCyM-02 se alimenta normalmente del radial MJ/E32-TR3/E04-TR1.

Ante un fallo en dicho radial, se da respaldo al Puesto de Conexión y Medida cerrando el acople de barras que normalmente separa E04-TR1 y E04-TR2 en la Estación 04. A continuación se presentan cinco tablas de resultados donde se utilizan varios factores de carga probabilizada para estudiar los casos de contingencia N-1:

		Carga - I/In(%)						
fp=1	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	68	30	45	103	197	158
	Falla cable entre E32-TR3 y CyM-02	46	-----	-----	16	36	129	111
	Falla cable entre CyM-02 y E04-TR1	70	36	16	-----	-----	94	87
	Falla cable entre E04-TR2 y E32-TR2	134	129	56	41	94	-----	23
	Falla cable entre E32-TR2 y MJ	158	163	72	56	128	34	-----

Tabla 9.16: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=1 – PCyM-02

		Carga - I/In(%)						
fp=0,9	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	61	27	41	93	181	145
	Falla cable entre E32-TR3 y CyM-02	41	-----	-----	14	32	120	103
	Falla cable entre CyM-02 y E04-TR1	63	32	14	-----	-----	88	81
	Falla cable entre E04-TR2 y E32-TR2	123	120	52	39	88	-----	21
	Falla cable entre E32-TR2 y MJ	144	151	66	52	119	31	-----

Tabla 9.17: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,9 – PCyM-02

		Carga - I/In(%)						
fp=0,8	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	54	24	36	82	157	126
	Falla cable entre E32-TR3 y CyM-02	37	-----	-----	13	29	103	89
	Falla cable entre CyM-02 y E04-TR1	56	28	12	-----	-----	75	70
	Falla cable entre E04-TR2 y E32-TR2	107	103	45	33	75	-----	19
	Falla cable entre E32-TR2 y MJ	126	130	57	45	102	27	-----

Tabla 9.18: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,8 – PCyM-02

		Carga - I/In(%)						
fp=0,7	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	47	21	31	72	137	110
	Falla cable entre E32-TR3 y CyM-02	32	-----	-----	11	25	90	78
	Falla cable entre CyM-02 y E04-TR1	49	25	11	-----	-----	65	61
	Falla cable entre E04-TR2 y E32-TR2	94	90	39	29	66	-----	16
	Falla cable entre E32-TR2 y MJ	110	114	50	39	89	24	-----

Tabla 9.19: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,7 – PCyM-02

		Carga - I/In(%)						
fp=0,65	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	44	19	29	67	128	102
	Falla cable entre E32-TR3 y CyM-02	30	-----	-----	10	23	84	72
	Falla cable entre CyM-02 y E04-TR1	45	23	10	-----	-----	61	57
	Falla cable entre E04-TR2 y E32-TR2	87	84	37	27	61	-----	15
	Falla cable entre E32-TR2 y MJ	102	106	46	36	83	22	-----

Tabla 9.20: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,65 – PCyM-02

Se desprende de las Tablas 9.16 a 9.20 que una falta en el tramo entre MJ y E32-TR3 es crítica con respecto a la sobrecarga en el tramo que va desde E04-TR2 y E32-TR2. Es por eso que se decide estudiar el respaldo cerrando el acople de barras en la E32 (E32-TR3 y E32-TR2) en vez de cerrar el acople en E04. Al correr un flujo de cargas con factor de carga probabilizada unitario, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9.21:

		Carga - I/In(%)								
fp=1	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ	MJ/E32-TR1	E32-TR1/E04-TR3
	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	75	33	17	40	54	157	74	42

Tabla 9.21: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=1 – Respaldo en E32

Con esto se logra mejorar la sobrecarga en el tramo entre E32-TR2 y MJ, pero aún sigue siendo crítica. Entonces se opta por estudiar el respaldo cerrando el acople de barras en la E32 (E32-TR3 y E32-TR2) y cerrando el acople de barras en la E04 (E04-TR3 y E04-TR2), dejando de esta forma fuera de servicio los cables entre E04-TR2 y E32-TR2 (abriendo disyuntores en E32 hacia E04). En la Tabla 9.22 se muestran los resultados obtenidos:

		Carga - I/In(%)								
	Falla	MJ/E32-TR3	E32-TR3/S3-N1	S3-N1/CyM-02	CyM-02/S4-N1	S4-N1/E4-TR1	E4-TR2/E32-TR2	E32-TR2/MJ	MJ/E32-TR1	E32-TR1/E04-TR3
fp=1	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	75	33	17	40	-----	120	112	96
fp=0,9	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	71	31	17	39	-----	111	100	86
fp=0,8	Falla cable entre MJ y E32-TR3	-----	60	26	14	32	-----	96	89	77

Tabla 9.22: Carga de los cables de MT para varios factores de carga probabilizada – Respaldo en E32 y E04

Se concluye que esta solución es admisible. Es importante aclarar que se debe instalar un disyuntor entre las barras asociadas a los transformadores 2 y 3 de la Estación 04 (actualmente solo hay un seccionador) tal como se muestra en la Figura 9.22:

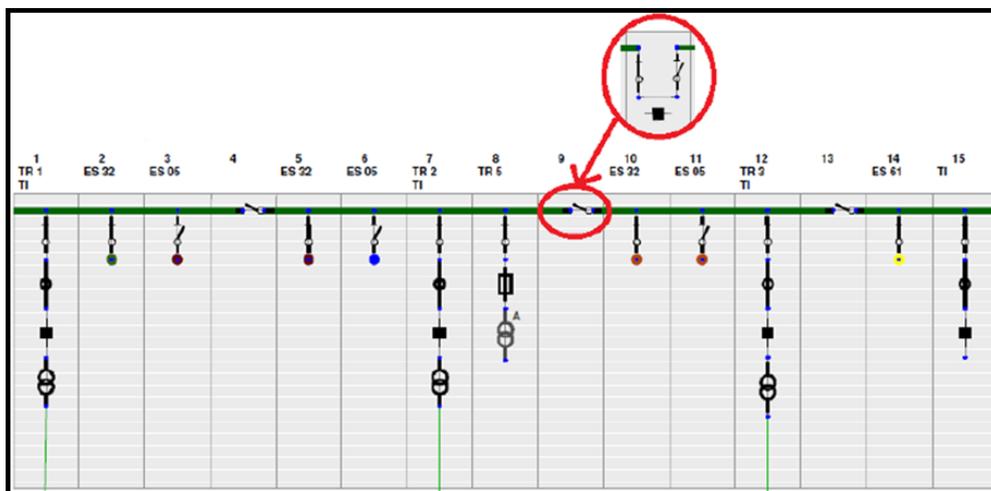


Figura 9.22: Disyuntor a instalar en la Estación 04[98]

9.3.3.3. Falla alimentación N de PCyM-03

Como se muestra en la Figura 9.19, el Puesto de Conexión y Medida PCyM-03 se alimenta normalmente del radial ME/E38/E65-TR1/E86/E47-TR1.

En una primera instancia, se estudia el respaldo mediante la Estación 47, es decir, cerrando el acople entre las barras E47-TR2 y E47-TR1. Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos.

		Carga - I/In(%)									
fp=1	Falla	ME/E38-TR2	E38-TR2/E65-TR1	E65-TR1/E86	E86/S5-N1	S5-N1/CyM-03	CyM-03/S5-N2	S5-N2/E47-TR1	E47-TR2/E65-TR2	E65-TR2/E38-TR3	E38-TR3/ME
	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	36	51	57	37	45	71	89	111	133
	Falla cable entre E38-TR2 y E65-TR1	35	-----	15	21	14	22	35	56	75	97
	Falla cable entre E65-TR1 y E86	50	15	-----	6	4	12	19	42	60	81
	Falla cable entre E86 y CyM-03	56	21	6	-----	-----	9	13	36	54	75
	Falla cable entre CyM-03 y E47-TR1	70	34	19	13	8	-----	-----	24	40	62
	Falla cable entre E47-TR2 y E65-TR2	96	61	46	40	25	17	26	-----	14	36
	Falla cable entre E65-TR2 y E38-TR3	110	75	60	54	34	26	41	13	-----	22
	Falla cable entre E38-TR3 y ME	133	97	82	76	49	40	63	33	22	-----

Tabla 9.23: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=1 – PCyM-03

		Carga - I/In(%)									
fp=0,9	Falla	ME/E38-TR2	E38-TR2/E65-TR1	E65-TR1/E86	E86/S5-N1	S5-N1/CyM-03	CyM-03/S5-N2	S5-N2/E47-TR1	E47-TR2/E65-TR2	E65-TR2/E38-TR3	E38-TR3/ME
	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	32	46	52	33	40	62	79	99	119
	Falla cable entre E38-TR2 y E65-TR1	32	-----	14	19	12	19	30	49	67	86
	Falla cable entre E65-TR1 y E86	45	14	-----	5	3	10	16	36	53	72
	Falla cable entre E86 y CyM-03	51	19	5	-----	-----	7	11	32	47	67
	Falla cable entre CyM-03 y E47-TR1	62	30	16	11	7	-----	-----	22	36	56
	Falla cable entre E47-TR2 y E65-TR2	85	54	40	35	22	15	24	-----	13	32
	Falla cable entre E65-TR2 y E38-TR3	98	66	53	47	30	23	36	12	-----	20
	Falla cable entre E38-TR3 y ME	118	86	73	67	43	36	56	30	20	-----

Tabla 9.24: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,9 – PCyM-03

		Carga - I/In(%)									
fp=0,8	Falla	ME/E38-TR2	E38-TR2/E65-TR1	E65-TR1/E86	E86/S5-N1	S5-N1/CyM-03	CyM-03/S5-N2	S5-N2/E47-TR1	E47-TR2/E65-TR2	E65-TR2/E38-TR3	E38-TR3/ME
	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	29	41	46	29	35	55	70	88	105
	Falla cable entre E38-TR2 y E65-TR1	28	-----	12	17	11	17	27	44	59	76
	Falla cable entre E65-TR1 y E86	40	12	-----	5	3	9	15	32	47	64
	Falla cable entre E86 y CyM-03	45	17	5	-----	-----	6	10	28	42	59
	Falla cable entre CyM-03 y E47-TR1	55	27	14	10	6	-----	-----	19	32	50
	Falla cable entre E47-TR2 y E65-TR2	76	48	36	31	20	14	21	-----	11	28
	Falla cable entre E65-TR2 y E38-TR3	87	59	47	42	27	21	32	10	-----	17
	Falla cable entre E38-TR3 y ME	105	77	64	60	38	32	50	26	18	-----

Tabla 9.25: Carga de los cables de MT con factor de carga probabilizada fp=0,8 – PCyM-03

Si se admite un 20% de sobrecarga en los cables y se considera carga probabilizada con un factor de 0,9 tal como se describe en la documentación analizada, entonces esta solución es admisible.

De todas formas, a continuación se estudian las maniobras de respaldo cuando falla el cable entre ME y E38-TR2 (caso crítico), cerrando el acople entre E38-TR2 y E38-TR3. En la Tabla 9.26 se presentan los resultados obtenidos al realizar dicha maniobra:

		Carga - I/In(%)												
Falla		ME/E38-TR2	E38-TR2/E65-TR1	E65-TR1/E86	E86/S5-N1	S5-N1/CyM-03	CyM-03/S5-N2	S5-N2/E47-TR1	E47-TR2/E65-TR2	E65-TR2/E38-TR3	E38-TR3/ME	ME/E82	E82/E71	E38-TR1/E71
fp=1	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	-----	27	21	14	6	9	16	74	96	102	84	59
fp=0,9	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	-----	25	19	12	5	8	14	66	86	92	75	53
fp=0,8	Falla cable entre ME y E38-TR2	-----	-----	22	17	11	5	7	13	59	76	82	67	47

Tabla 9.26: Carga de los cables de MT para varios factores de carga probabilizada – Respaldo en E38

También debe aclararse que, para realizar esta maniobra eficazmente, se debe de instalar un disyuntor entre E38-TR2 y E38-TR3 tal como se puede observar en la Figura 9.23:

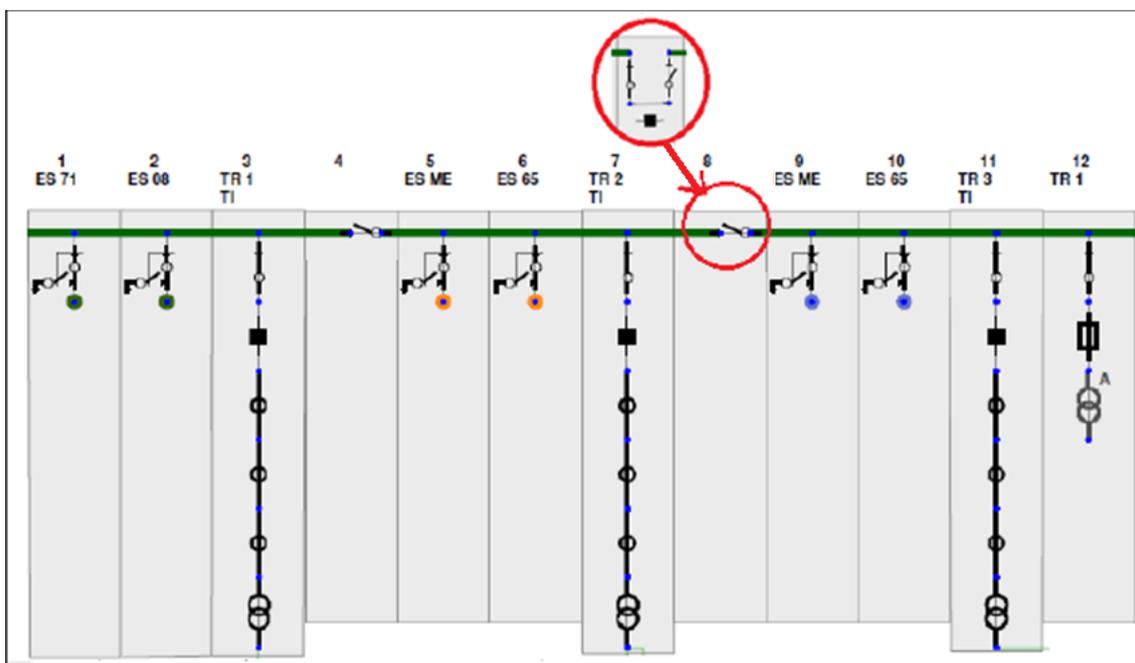


Figura 9.23: Disyuntor a instalar en la Estación 38[98]

Para realizar un estudio más profundo sobre el tema, se debe verificar que las caídas de tensión se encuentren dentro de los límites especificados por la URSEA.

Capítulo 10: Efecto en las Curvas de Carga y Demanda

El objetivo del siguiente estudio es determinar:

- El efecto que tendría la implementación de las subestaciones de tracción en la curva de carga de las subestaciones adyacentes a éstas, así como también en la curva de carga general de la zona por donde circularía el tranvía
- El efecto que tendría en la curva de demanda total de Uruguay la implementación del sistema ferroviario planteado

Para el estudio se toman los datos del día 25 de Julio de 2012, pico del Invierno 2012 en Uruguay. [94]

10.1 Efecto en las Curvas de Carga

10.1.1 Efecto en cada subestación

A continuación se estudia el efecto que tiene la inclusión de cada subestación de tracción en las subestaciones contiguas a la misma, suponiendo que la cantidad máxima de tranvías por subestación por hora es la que se aprecia en la Tabla 10.1:

Hora	Cantidad máxima de Tranvías por SSEE	Hora	Cantidad máxima de Tranvías por SSEE
0	1	12	4
1	1	13	4
2	1	14	4
3	1	15	4
4	1	16	4
5	1	17	4
6	1	18	4
7	1	19	4
8	2	20	2
9	2	21	2
10	2	22	1
11	3	23	1

Tabla 10.1: Cantidad máxima de tranvías por subestación de tracción

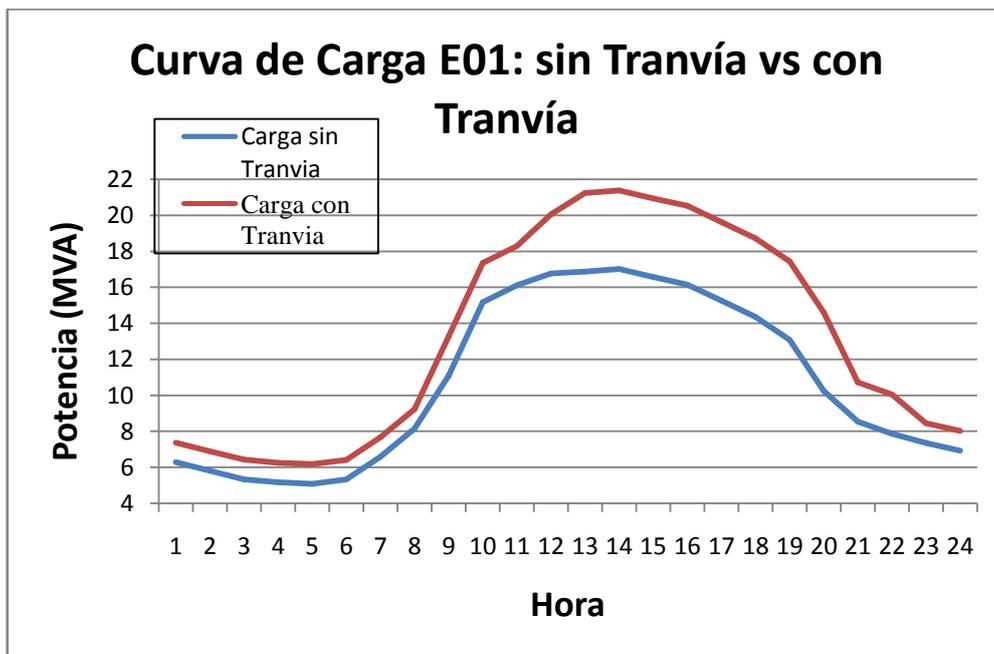
Debido a la falta de datos sobre el consumo de potencia del tranvía durante el arranque y durante el frenado del mismo, se considera que la potencia que consume es constante e igual al valor máximo, el cual es de 545kW. Asumir que el tranvía consume una potencia constante durante todo su recorrido es una hipótesis que se aleja de la realidad, ya que durante el arranque y frenado el tranvía presenta picos de consumo de potencia de importante magnitud. Para poder realizar un estudio más preciso sobre el efecto que tendría la inclusión de las subestaciones de tracción en las curvas de carga y demanda de Uruguay, se debiera disponer de dichos datos.

Sin embargo, a pesar de no disponer de los mismos, al considerar que la potencia que consume el tranvía durante todo su recorrido es constante e igual a la máxima, se está realizando un análisis sobre el peor escenario posible, con lo cual resulta de interés el estudio propuesto.

Conociendo la cantidad de tranvías que serían alimentados por cada subestación de tracción por hora, y sabiendo que la potencia máxima que consume un tranvía es de

545kW, se puede graficar la curva de carga de las estaciones de 30kV que alimentan las diferentes subestaciones de tracción.

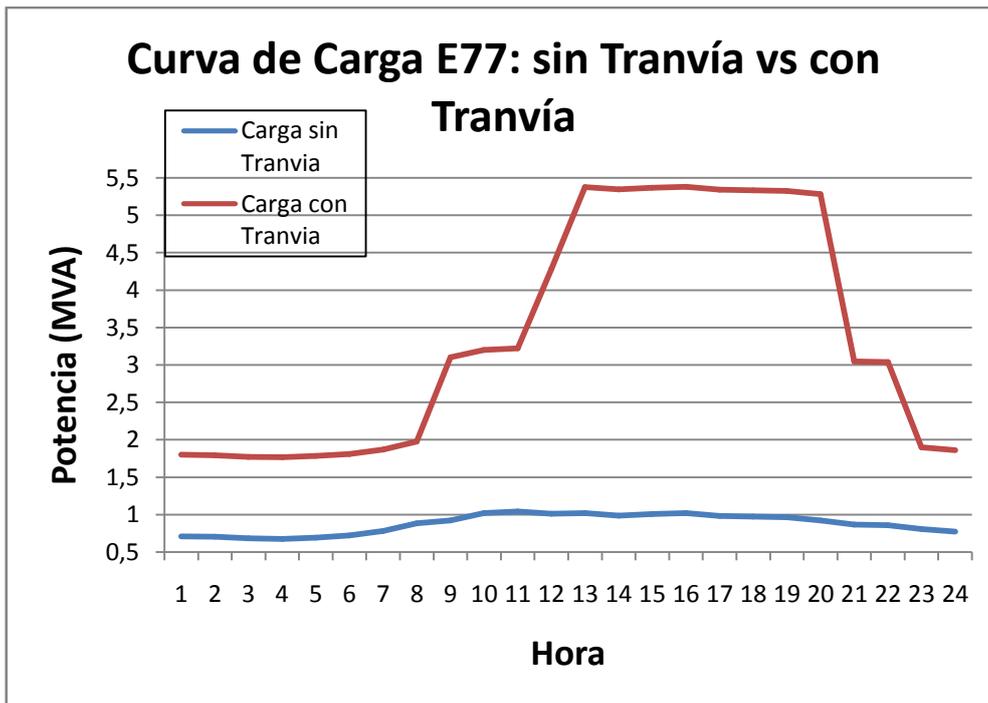
En la Gráfica10.1 se muestra la curva de carga de la Estación 01, suponiendo que la misma alimenta las subestaciones de tracción 1 y 2:



Gráfica 10.1: Curvas de Carga de la Estación 01 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica10.1, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 21,4MVA, que corresponde a un 25,6% a la hora 13:00.

En la Gráfica10.2 se muestra la curva de carga de la Estación 77, suponiendo que la misma alimenta las subestaciones de tracción 1 y 2:

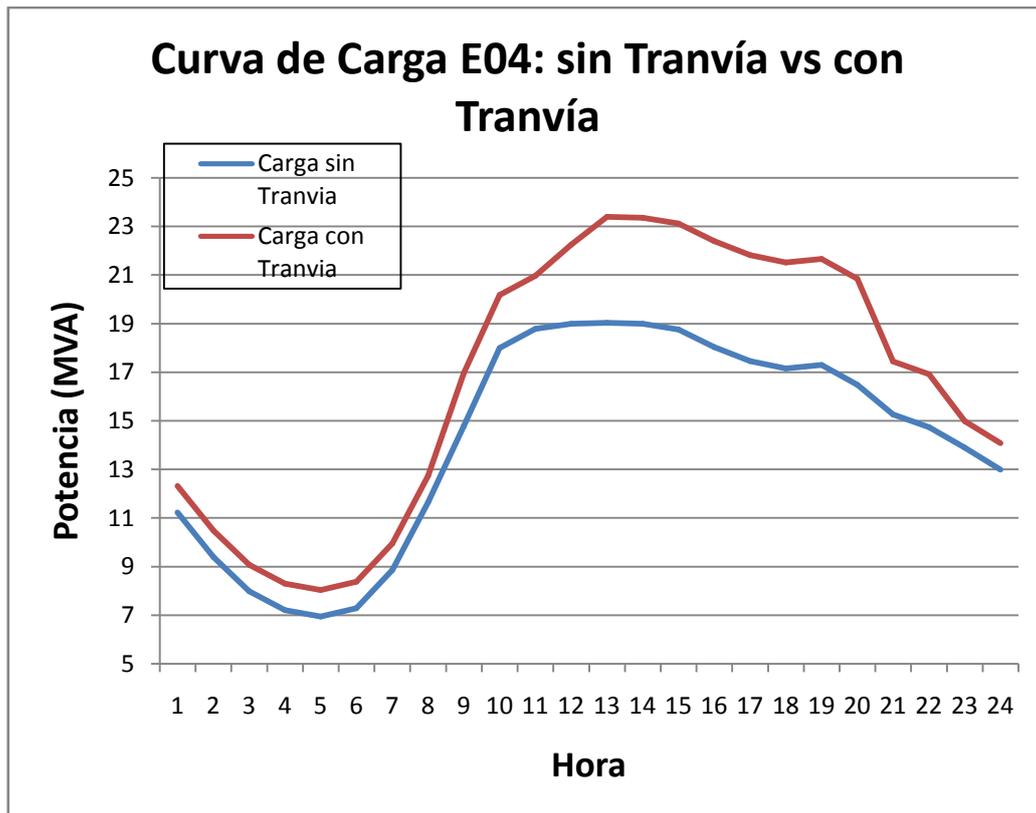


Gráfica 10.2: Curvas de Carga de la Estación 77 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica 10.2, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 5,4 MVA, que corresponde a un 427,5% a la hora 15:00.

Estas dos subestaciones son adyacentes a las subestaciones de tracción 1 y 2. Como se ve en el estudio de flujo de carga, no es problema para la red alimentar dichas subestaciones de las E01 y E77.

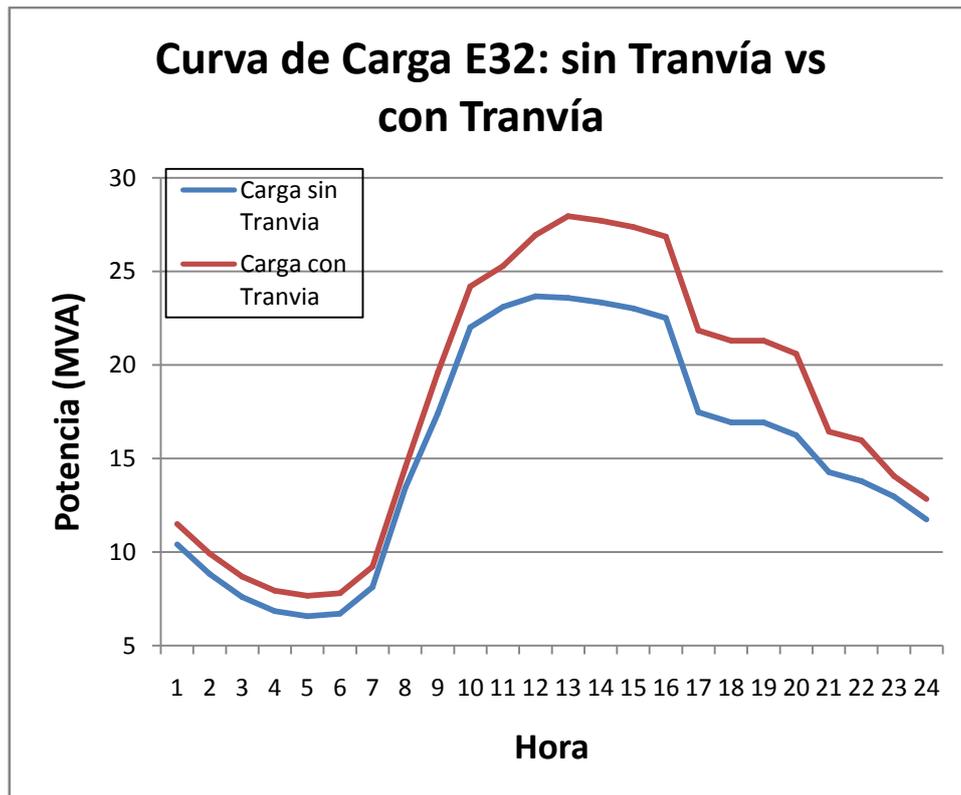
En la Gráfica 10.3 se muestra la curva de carga de la Estación 04, suponiendo que la misma alimenta las subestaciones de tracción 3 y 4:



Gráfica 10.3: Curvas de Carga de la Estación 04 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica10.3, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 23,4MVA, que corresponde a un 22,9% a la hora 12:00.

En la Gráfica10.4 se muestra la curva de carga de la Estación 32, suponiendo que la misma alimenta las subestaciones de tracción 3 y 4:

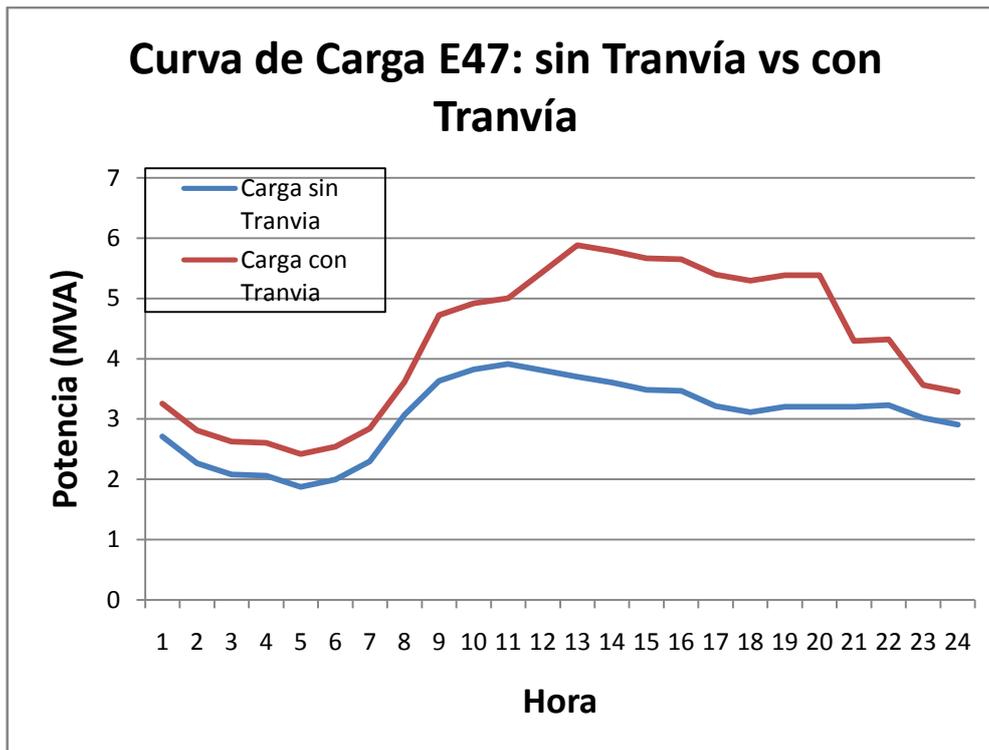


Gráfica 10.4: Curvas de Carga de la Estación 32 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica10.4, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 27,9MVA, que corresponde a un 18,5% a la hora 12:00.

Estas dos subestaciones son adyacentes a las subestaciones de tracción 3 y 4. Como se ve en el estudio de flujo de carga, no es problema para la red alimentar dichas subestaciones de las E04 y E32.

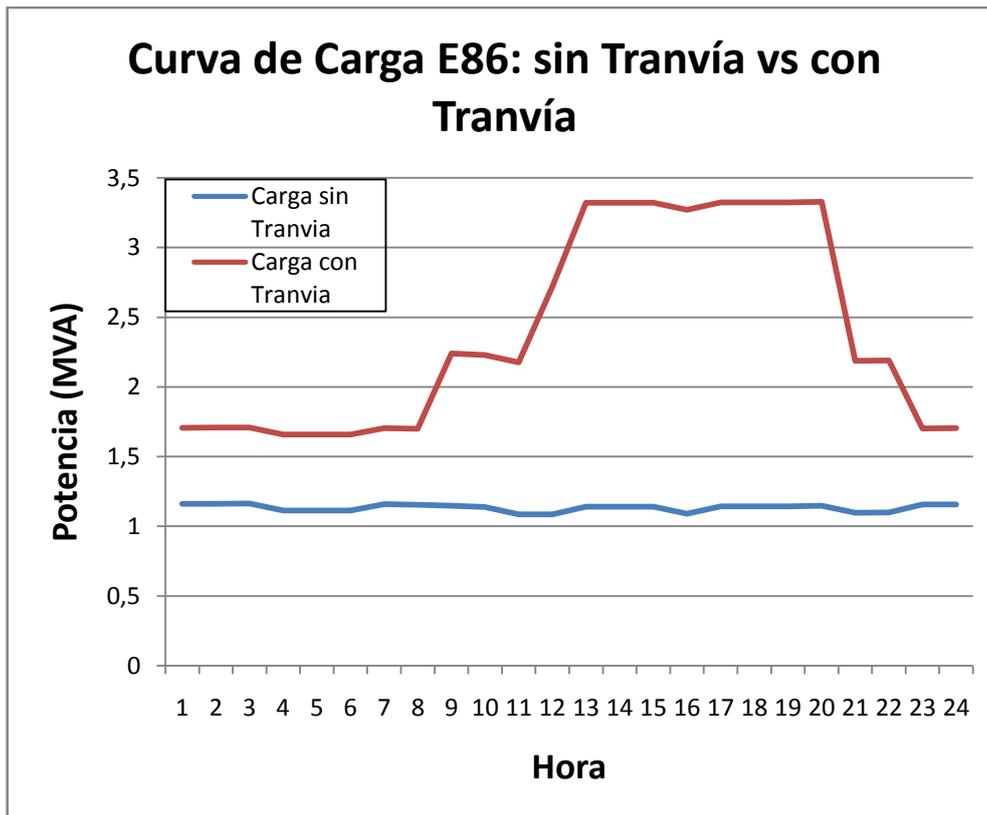
En la Gráfica10.5 se muestra la curva de carga de la Estación 47, suponiendo que la misma alimenta la subestación de tracción 5:



Gráfica 10.5: Curvas de Carga de la Estación 47 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica10.5, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 5,9MVA, que corresponde a un 58,9% a la hora 12:00.

En la Gráfica10.6 se muestra la curva de carga de la Estación 86, suponiendo que la misma alimenta la subestación de tracción 5:



Gráfica 10.6: Curvas de Carga de la Estación 86 con y sin tranvía

Como se puede apreciar en la Gráfica 10.6, la carga aumenta considerablemente a toda hora, alcanzando un pico máximo de 3,3 MVA, que corresponde a un 190,1% a la hora 19:00.

Estas subestaciones son adyacentes a la subestación de tracción 5. Como se ve en el estudio de flujo de carga, no es problema para la red alimentar dicha subestación de la E47 y E86.

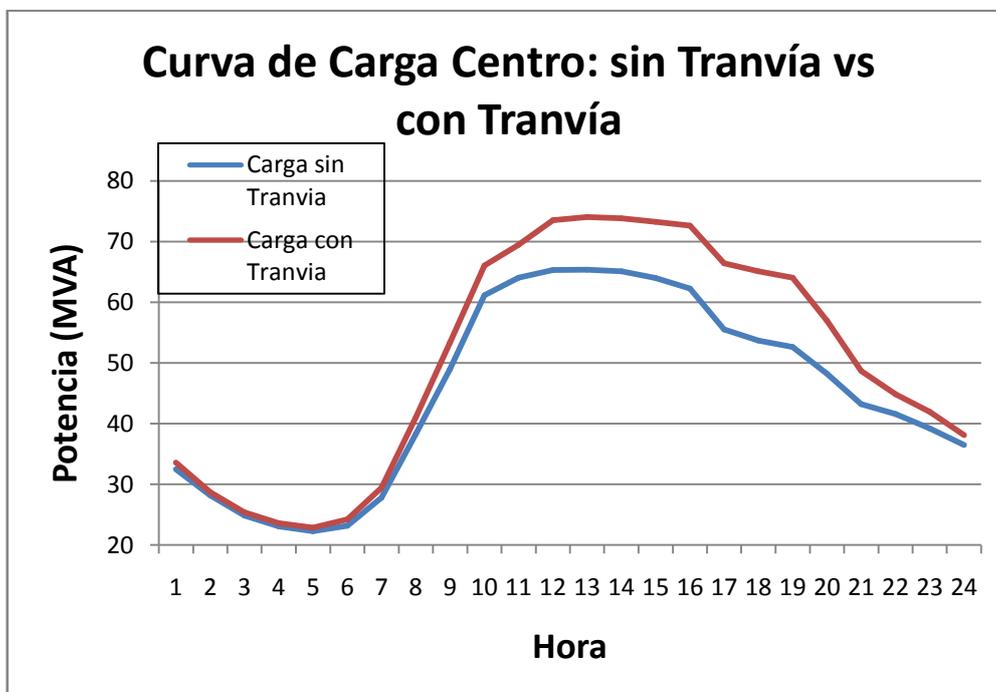
10.1.2 Efecto en la zona de conexión

Se estudia el efecto de la conexión de las subestaciones de tracción en la zona donde funcionaría el tranvía, considerando únicamente las estaciones de Media Tensión adyacentes a las subestaciones de tracción, suponiendo que la cantidad de tranvías por hora es la siguiente:

Hora	N° de tranvías	Potencia Total (kW)	Hora	N° de tranvías	Potencia Total (kW)
0	2	1090	12	16	8720
1	1	545	13	16	8720
2	1	545	14	17	9265
3	1	545	15	19	10355
4	1	545	16	20	10900
5	2	1090	17	21	11445
6	3	1635	18	21	11445
7	5	2725	19	16	8720
8	8	4360	20	10	5450
9	9	4905	21	6	3270
10	10	5450	22	5	2725
11	15	8175	23	3	1635

Tabla 10.2: Cantidad de Tranvías y Carga por hora de SSEE de Tracción

La siguiente gráfica muestra el efecto de la inclusión de las subestaciones de tracción en la curva de carga de la zona en estudio:



Gráfica 10.7: Curvas de Carga del Centro con y sin tranvía

Se puede apreciar en la Gráfica 10.7 el efecto que tiene en la curva de carga de la zona en estudio la inclusión de las subestaciones de tracción. El aumento en la carga alcanza un pico máximo de 74,1MW en el entorno de las 12:00hs (13,3% de aumento de carga). Por lo tanto, se concluye que la conexión de 5 subestaciones de tracción es posible sin afectar a la red de manera considerable. Además, en configuración normal ninguna línea de la red actual en 30kV se sobrecarga (ver Capítulo 9 – Flujo de Carga).

10.2 Efecto en la Curva de Demanda

El pico de demanda de Uruguay el 25 de Julio de 2012 fue de 1723,3MW a las 21:00hs [94]. En la Tabla 10.3 se presenta el desglose por hora de la demanda total del Uruguay:

Hora	Demanda Total (MW)	Hora	Demanda Total (MW)
0	1348,3	12	1506,9
1	1190,3	13	1462,8
2	1076,0	14	1442,1
3	1029,6	15	1418,0
4	998,4	16	1391,0
5	1023,7	17	1386,7
6	1078,7	18	1464,2
7	1248,4	19	1673,1
8	1343,8	20	1712,1
9	1449,2	21	1723,3
10	1518,0	22	1653,2
11	1515,8	23	1540,7

Tabla 10.3: Demanda total por hora de Uruguay [94]

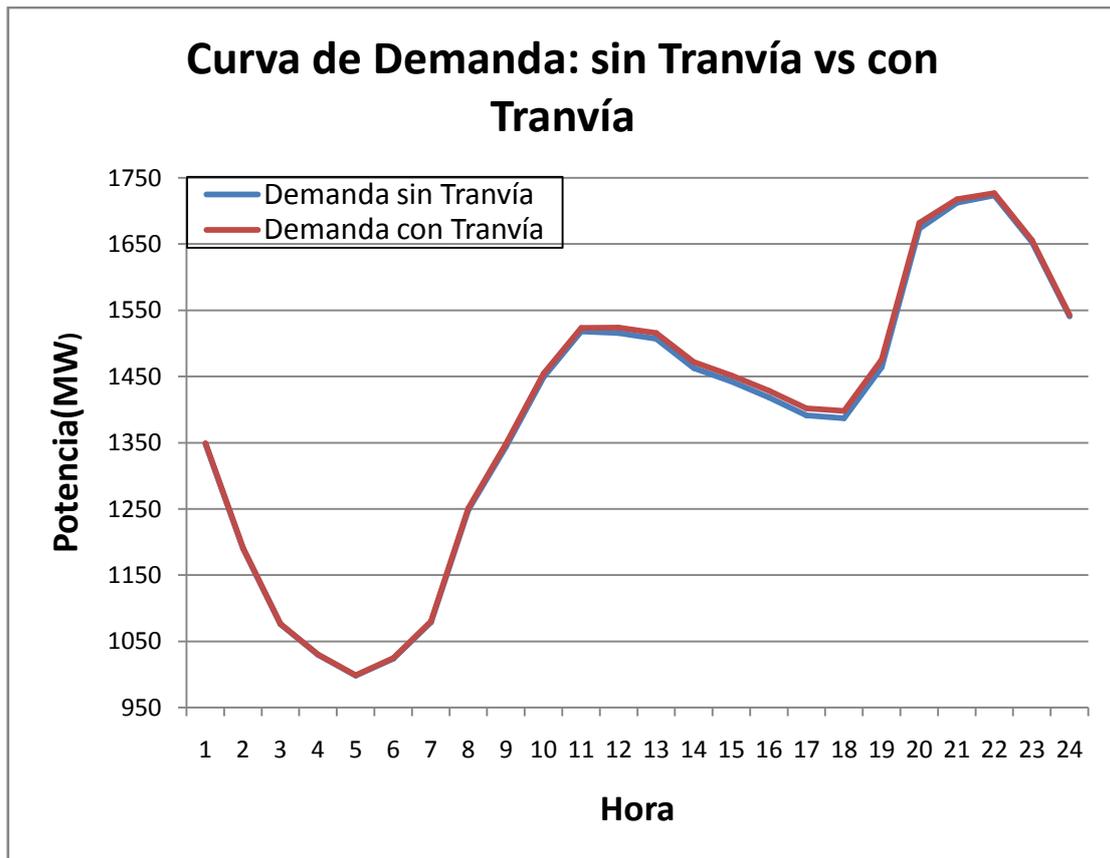
Tal como se mencionó anteriormente, debido a la falta de datos sobre el consumo de potencia del tranvía durante el arranque y durante el frenado del mismo, se considera que la potencia que consume es constante e igual al valor máximo, el cual es de 545kW.

En la Tabla 10.4 se muestra la potencia total de los tranvías que circulan por hora por el trayecto elegido:

Hora	Nº de Tranvías necesarios	Potencia Total (kW)	Hora	Nº de Tranvías Necesarios	Potencia Total (kW)
0	2	1090	12	16	8720
1	1	545	13	16	8720
2	1	545	14	17	9265
3	1	545	15	19	10355
4	1	545	16	20	10900
5	2	1090	17	21	11445
6	3	1635	18	21	11445
7	5	2725	19	16	8720
8	8	4360	20	10	5450
9	9	4905	21	6	3270
10	10	5450	22	5	2725
11	15	8175	23	3	1635

Tabla 10.4: Potencia total de las subestaciones de tracción

Conociendo la potencia que consumen los tranvías por hora en el trayecto determinado, se puede incluir dicha potencia en la curva de demanda de Uruguay. Las curvas de demanda tanto para el escenario con tranvías como sin los mismos (situación actual) se presentan en la Gráfica 10.8:



Gráfica 10.8: Curvas de Demanda con y sin las SSEE de tracción

Tal como se puede apreciar en la Gráfica 10.8, el efecto que tiene la inclusión de las subestaciones de tracción en la curva de demanda del Uruguay es muy bajo. Por lo tanto, se concluye que la conexión de 5 subestaciones de tracción se puede efectuar sin la necesidad de aumentar la generación del parque generador de la empresa distribuidora de energía, que actualmente genera 2560MW.[94]

Capítulo 11: Puesta a Tierra

Durante una falta a tierra en una subestación, el flujo de corriente a tierra produce gradientes de potencial dentro y alrededor de la misma. A menos que sean tomadas precauciones especiales en el diseño, el gradiente de potencial máximo en la superficie del suelo puede ser suficientemente elevado como para poner en peligro a una persona en el área.[101]

Los objetivos de una puesta a tierra son:

- Proveer un camino hacia tierra de las corrientes bajo condiciones normales y de falta sin que se excedan los límites de operación de los equipamientos ni se afecte la continuidad del servicio
- Asegurar que una persona en la cercanía de las instalaciones puestas a tierra no está expuesta al peligro de un choque eléctrico crítico

Para un diseño seguro de una puesta a tierra se debe controlar la interacción de dos sistemas de tierra: la tierra intencional, consistente en electrodos de tierra enterrados en el suelo; la tierra accidental, temporaria que se establece a través de una persona expuesta a un gradiente de potencial en las cercanías de la instalación aterrada.[101]

La instalación de un sistema de puesta a tierra debe realizarse entonces de manera que limite el efecto de gradientes de potencial de tierra y de corrientes que puedan dañar las personas o el equipamiento en condiciones normales o de falta, asegurando asimismo la continuidad del servicio.[101]

Una grilla de conductores horizontales puede ser efectiva. Sin embargo, utilizar además jabalinas puede ser útil, ya que permiten llegar a las capas inferiores del suelo, estabilizando el desempeño del sistema (puesto que la resistividad de las capas superiores puede variar, no así la de las capas inferiores).[101]

Asimismo, si las jabalinas se instalan predominantemente en el perímetro de la grilla, se logra disminuir los gradientes de potencial en la periferia de la misma.[101]

11.1. Diseño de la Malla de Puesta a Tierra

En la Figura 11.1 se puede apreciar el diagrama de bloques utilizado como guía para el diseño de la malla de puesta a tierra de las subestaciones de tracción.

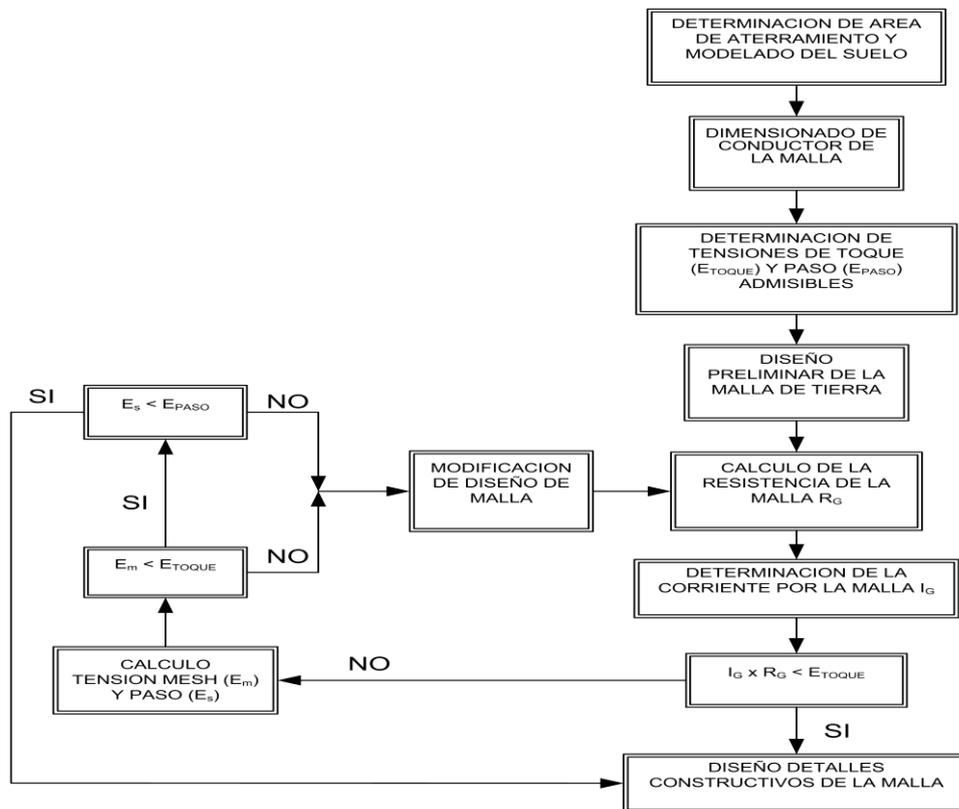


Figura 11.1: Diagrama de bloques para el diseño de una Puesta a Tierra[67]

11.2. Determinación del área de aterramiento y modelado del suelo

El suelo se comporta como una resistencia r y como un dieléctrico. Salvo para el caso de altas frecuencias y frentes de onda escarpados penetrando en un suelo de alta resistividad, las corrientes de carga son despreciables frente a las corrientes resistivas y, por lo tanto, el suelo puede ser representado como una resistencia pura.[101]

Para el diseño de la malla de puesta a tierra, es necesario conocer la resistividad aparente del suelo. Comúnmente se utiliza el Método de Wenner, mediante el cual se estima la resistividad del suelo a varias profundidades. Luego, se modela el suelo

utilizando el Modelo en Dos Capas. Una vez obtenido dicho modelo, se utiliza el Método de Endreyi para calcular la resistividad aparente del terreno.

Dado que no se dispone de los elementos para poder realizar dicho método para medir la resistividad aparente del suelo, se utilizan los siguientes valores de resistividad:

Estación	Ubicación	Resistividad Aparente (Ωm)
01	Ciudad Vieja	30
96	Convención y Mercedes	50

Tabla 11.1: Resistividades aparentes

Para el cálculo de la malla de puesta a tierra se va a utilizar la resistividad aparente que resulte más favorable, ya que no se disponen de los valores de resistividad del suelo en los lugares donde se conectan las subestaciones de tracción.

Las tensiones de Mesh, de Step y el GPR de la subestación dependen directamente de la resistividad aparente. Por lo tanto, la resistividad aparente que se utilizará será la de la Estación 01, ya que la misma hace que el GPR y las tensiones de Mesh y de Step sean menores.

En resumen, la resistividad aparente que se utilizará es la siguiente:

$$\rho_a = 30\Omega\text{m} \quad (1)$$

El diseño de la malla de puesta a tierra debe dividirse en 3 diseños separados: uno correspondiente a las Subestaciones 1 y 2 (Plaza de la Constitución), otro correspondiente a las Subestaciones 3 y 4 (Plaza de los 33 Orientales), y un tercer diseño correspondiente a la Subestación 5 (Parque Batlle). Las Subestaciones 1 y 2 tendrán una única malla de puesta a tierra, al igual que las Subestaciones 3 y 4.

El área de aterramiento para las Subestaciones 1 y 2 corresponde a la superficie de ambas subestaciones. Lo mismo sucede con el área de aterramiento de las

Subestaciones 3 y 4. En cuanto a la puesta a tierra de la Subestación 5, el área de aterramiento corresponde a la superficie de una subestación de tracción.

11.3. Dimensionado del conductor de la malla

Cada elemento constitutivo del sistema de PAT (conductores, uniones, chicotes de conexión, electrodos primarios) debe estar diseñado para que durante toda la vida útil de la instalación tenga suficiente conductividad (como para no producir diferencias locales de potencial), resista el calentamiento y el deterioro mecánico bajo las peores condiciones de corrientes de falta y duración, y sea mecánicamente confiable, especialmente en lugares expuestos a la corrosión y exigencia mecánicas.[101]

El conductor de la malla que se utilizará será de cobre porque tiene una alta conductividad y es resistente a la corrosión en el suelo, ya que es catódico respecto a otros metales que puedan estar enterrados. La desventaja es que acelera la corrosión de otras estructuras metálicas enterradas.[101]

Las uniones entre conductores y entre conductores y jabalinas se realizarán mediante soldadura exotérmica. En este caso, la conexión puede ser vista como parte integral de un único conductor homogéneo.[101]

Los conductores de la grilla deben soportar, sin fundirse, la corriente máxima de falta a tierra prevista.[101] La mínima sección de los conductores se halla mediante la siguiente ecuación:

$$S_{min} = I \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}\right)}{\ln\left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)\right]}} \quad (2)$$

En donde:

I: valor eficaz de la corriente de falta a tierra en kA

S_{min}: sección mínima del conductor de la grilla en mm²

T_m : máxima temperatura en °C
 T_a : temperatura ambiente en °C
 T_r : temperatura de referencia para los materiales en °C
 α_0 : coeficiente térmico de la resistividad a 0°C
 α_r : coeficiente térmico de la resistividad a T_r
 ρ_r : resistividad del conductor a T_r en $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
 K_0 : $1/\alpha_0$
 t_c : tiempo de circulación de la corriente en s
 TCAP: factor de capacidad térmica en $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$

De la Norma IEEE 80 (p. 42) se obtienen los valores de las constantes. Se utilizará cobre recocido de elaboración suave, debido a su alta conductividad (100%).

Para el tiempo de circulación de la corriente de falla a tierra, se va a considerar un peor caso, imponiendo dicho tiempo igual a 1s. En la realidad, esto no es así, ya que los tiempos de apertura de las protecciones son mucho menores que este tiempo. Para el caso del diseño de la malla de puesta a tierra, conviene tomar un peor caso de modo que la misma no quede tan ajustada.

Ahora bien, resta determinar la máxima corriente de falta a tierra para poder calcular así la mínima sección del conductor de la malla de puesta a tierra.

Interesan dos tipos de defectos evaluados en todos los niveles de tensión existentes en la instalación: cortocircuito de una fase a tierra (1FT) y de dos fases a tierra (2FT)[101]. Dado que en Baja Tensión se tiene un sistema de distribución TN, la corriente de falta a tierra circula por el conductor de protección y no por la malla, con lo cual no aporta al aumento del GPR. Por lo tanto, los cortocircuitos 1FT y 2FT se deben hallar para Media Tensión.

Las ecuaciones que caracterizan cada uno de los cortocircuitos antes mencionados son:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{1FT} = \frac{3 \cdot E_d}{Z_s + Z_a + Z_o + 3 \cdot Z_f} \\ I_{2FT} = \frac{3 \cdot |Z_a \cdot E_d|}{|Z_s \cdot Z_a + (Z_o + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_s + Z_a)|} \end{array} \right. \quad (3)$$

En donde Z_s es la impedancia síncrona del circuito, Z_a es la asíncrona, Z_o es la de secuencia cero, Z_f es la impedancia de la puesta a tierra del neutro de la red y E_d es la tensión fase-neutro. En este caso, el neutro de la red está puesto a tierra a través de una resistencia de 50Ω . Por lo tanto: $Z_f = R = 50\Omega$.

Dado que $3 \cdot R \gg Z_s + Z_a + Z_o$, queda establecida una cota superior para cada uno de los cortocircuitos. Considerando que $Z_s \cong Z_a$, las corrientes de cortocircuito quedan de la siguiente manera:

$$\begin{cases} I_{1FT} = \frac{3 \cdot E_d}{Z_s + Z_a + Z_o + 3 \cdot R} \leq \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R} \\ I_{2FT} = \frac{3 \cdot |Z_a \cdot E_d|}{|Z_s \cdot Z_a + (Z_o + 3 \cdot R) \cdot (Z_s + Z_a)|} \leq \frac{U}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot R} \end{cases} \quad (4)$$

Tal como se puede apreciar en las ecuaciones (4), la corriente de falta a tierra más elevada será la corriente de cortocircuito entre una fase y tierra, 1FT.

Ahora bien, conociendo que la resistencia de puesta a tierra del neutro de la red es de 50Ω se puede calcular la cota superior de la corriente de cortocircuito 1FT (dicha cota será utilizada para dimensionar la malla de puesta a tierra, ya que corresponde a un caso más comprometedor), y sustituyendo esta corriente en la ecuación (2) se halla la mínima sección que debe tener el conductor de la malla.

El valor de la máxima corriente de cortocircuito a tierra junto con la mínima sección del conductor de la malla se presentan en la Tabla 11.2:

	I_{cc1FT} (A)	S_{min} (mm²)
SSEE 1 y 2	363,7	2
SSEE 3 y 4	363,7	2
SSEE 5	363,7	2

Tabla 11.2: Máxima corriente de cortocircuito y mínima sección del conductor de la malla

Como se puede apreciar en la Tabla 11.2, las secciones mínimas de los conductores de las mallas de puesta a tierra son bajas. Por lo tanto, se decide utilizar un

cable de cobre desnudo de 50mm² de sección para las mallas de PAT, ya que es la sección de cable que comúnmente es utilizada.

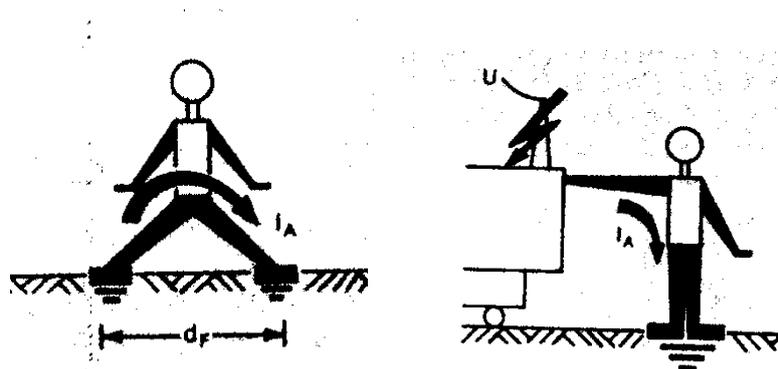
11.4. Determinación de las tensiones admisibles

Basados en los estudios de Dalziel, se asume que el 99,5% de las personas pueden con seguridad soportar, sin fibrilación ventricular, el pasaje de una corriente cuyo valor y duración responden a la ecuación (5):

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

siendo t_s el tiempo de actuación (en s) de las protecciones, $k=0,116$ para un peso del cuerpo de 50kg y $k=0,157$ para un peso del cuerpo de 70kg ([101], p. 16).

Ahora bien, asumiendo que las resistencias de contacto de manos y pies son cero (es decir, la persona no tiene guantes ni zapatos que proporcionen una resistencia adicional), y suponiendo que la resistencia a tierra de un pie es igual a $3 \cdot \rho$ (siendo ρ la resistividad del suelo), los circuitos de tierra accidental que se pueden dar, junto con la resistencia equivalente de los mismos, son los siguientes:



$$R_A = R_B + 6\rho \quad R_A = R_B + 1.5\rho$$

Figura 11.2: Circuitos de tierra accidental[67]

Se asume que la resistencia entre mano y pie o entre pie y pie, R_B , es igual a 1000Ω . [101]

11.5. Diferencia de potencial admitida

En la Figura 11.3 se muestran las distintas situaciones en las que se puede encontrar una persona respecto a tierra durante un defecto en la subestación:

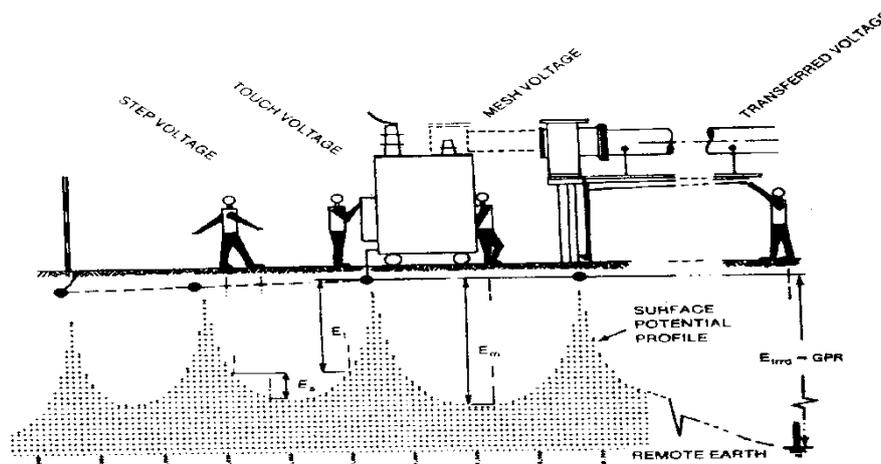


Figura 11.3: Situaciones en las que puede estar una persona respecto a tierra durante un defecto en la subestación [67]

A continuación se definen las tensiones mencionadas en la Figura 11.3:

- Tensión de Paso: tensión entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a 1m, en la dirección del gradiente de potencial máximo.
- Tensión de Contacto (Toque): diferencia entre el GPR y el potencial de la superficie donde la persona se encuentra tocando la estructura puesta a tierra.
- GPR: voltaje máximo que alcanza la malla de puesta a tierra de la subestación respecto a una tierra lejana.
- Tensión "mesh" (reticulado): máxima tensión de contacto que puede ocurrir en el reticulado de la malla.

- Tensión transferida: caso especial de tensión de toque donde un voltaje es transferido hacia dentro o hacia fuera de la subestación. [101]

Tal como se mencionó anteriormente, la instalación de un sistema de puesta a tierra debe realizarse de manera que limite el efecto de gradientes de potencial de tierra y de corrientes que puedan dañar las personas o el equipamiento en condiciones normales o de falta, asegurando asimismo la continuidad del servicio.[101]

Por lo tanto, debemos preguntarnos: ¿cuál es el voltaje que produce una corriente igual a la máxima admitida?[101] Esta tensión se calcula según la siguiente ecuación:

$$E = R_A \cdot I_B \quad (6)$$

Utilizando las ecuaciones (5) y (6), y obteniendo la resistencia R_A de la Figura 11.2, quedan determinadas las tensiones de toque y de paso máximas admisibles:

$$\begin{cases} E_T = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \cdot (1000 + 1,5 \cdot \rho_a) \\ E_S = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \cdot (1000 + 6 \cdot \rho_a) \end{cases} \quad (7)$$

Se supuso un peso del cuerpo humano de 50kg, ya que corresponde a un caso más comprometedor. Considerando un tiempo de actuación de las protecciones de 1s (peor caso), las tensiones máximas admisibles de toque y de paso resultan ser:

	$\rho_a=30\Omega\text{m}$
E_{T_max} (V)	121
E_{S_max} (V)	137

Tabla 11.3: Tensiones de toque y de paso máximas admisibles

La resistividad aparente del suelo $\rho_a=30\Omega\text{m}$ corresponde a la Estación 01 (Ciudad Vieja).

11.6. Diseño preliminar de la malla de puesta a tierra

Para el diseño preliminar de la malla de puesta a tierra, lo primero que se debe realizar es un análisis del plano de planta de la subestación, en el cual se encuentren ubicados los equipamientos de la misma (ver planos adjuntos en el Anexo). Un anillo conductor continuo debe rodear todo el perímetro, abarcando la mayor área posible.

Dentro del anillo se extienden los conductores horizontales y verticales, siguiendo dentro de lo posible las filas y columnas definidas por los equipamientos de modo de reducir el largo de la conexión.[101]

En los Planos PEPT-2 y PEPT-3 (se adjuntan) se presenta el plano de planta de la subestación (subestación simple y doble respectivamente), con la ubicación del equipamiento y la grilla de puesta a tierra planteada. La misma se extiende 1m por fuera de la subestación, de modo de reducir los gradientes de potencial en el perímetro de la misma. Todas las estructuras metálicas presentes en la subestación (construcciones metálicas de cualquier tipo, tanques de transformadores, soportes para equipos, bandejas, celdas de media tensión, gabinetes del rectificador, inversor y switches de continua, etc.) serán conectadas a la malla de puesta a tierra.

Todas estas estructuras metálicas antes mencionadas se conectan a la malla de puesta a tierra a través de dos chicotes distintos de igual sección que el conductor utilizado para la malla, ya que los mismos deberán soportar toda la corriente de falta a tierra.

Los rectángulos de la grilla tienen dimensiones típicas de 3 a 7 metros, con relación 1:1 a 1:3[101]. En este caso, la grilla está formada por cuadrados de 4m de lado, con jabalinas enterradas a lo largo del perímetro de 2,5m de largo y 5/8'' de diámetro. A su vez, el neutro del secundario del transformador de servicios auxiliares está conectado a tierra a través de una jabalina de iguales medidas que las anteriormente mencionadas y conectado a la malla.

11.7. Determinación de la resistencia de puesta a tierra

Un sistema ideal de puesta a tierra debería tener una resistencia (R_g) cercana a cero respecto a una tierra remota[101].

Para determinar la resistencia de la puesta a tierra, se utiliza la Aproximación de Sverak:

$$R_g = \rho_a \cdot \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1+h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (8)$$

donde ρ_a es la resistividad aparente del terreno (en Ωm), L es el largo total de cobre enterrado (en m), A es el área de aterramiento (en m^2) y h es la profundidad de aterramiento (en m).

Utilizando dicha aproximación, la resistencia de puesta a tierra para los tres casos de diseño resulta ser:

	L (m)	A (m²)	h (m)	R_g (Ω)
SSEE 1 y 2	182,7	194,4	2,0	0,94
SSEE 3 y 4	182,7	194,4	2,0	0,94
SSEE 5	96,8	96,0	2,0	1,35

Tabla 11.4: Resistencia de Puesta a Tierra

11.8. Circulación de corriente por la malla

La corriente que circula por la malla se determina según la siguiente fórmula:

$$I_g = C_p \cdot D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (9)$$

donde C_p es el factor de corrección que prevé el crecimiento futuro de la red, D_f corresponde al factor de decremento, S_f es el factor de distribución de la corriente por la malla e I_f corresponde al valor eficaz de la corriente de falta a tierra.

El factor de corrección, C_p , se considera igual a 1 puesto que el neutro de la red está aterrado con una resistencia de 50Ω por parte de UTE. Asimismo, no está previsto un aumento en la potencia instalada.

Según la Norma IEEE 80 (p. 84) se puede considerar el factor de decremento igual a 1 para faltas que duren 30 ciclos o más, lo que corresponde a 600ms para una frecuencia de operación de 50Hz. En este caso, se está considerando que las protecciones actúan en un tiempo igual a 1s, con lo cual se puede considerar que $D_f=1$.

Por último, como el neutro de la red está aterrado en una ubicación remota, una parte de la corriente de falta tiende a circular por la tierra y no por la malla, con lo cual el factor de distribución resulta ser menor que uno. Sin embargo, por tratarse de un caso más comprometedor, se considera $S_f=1$.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la corriente que circula por la malla de puesta a tierra para las distintas subestaciones de tracción coincide con la corriente de falta a tierra y se presenta en la siguiente tabla:

	I_g (A)
SSEE 1 y 2	363,7
SSEE 3 y 4	363,7
SSEE 5	363,7

Tabla 11.5: Corriente de circulación por la malla de puesta a tierra

11.9. Cálculo del GPR

Se define el GPR como el “voltaje máximo que alcanza la malla de puesta a tierra de la subestación respecto a una tierra lejana” [101]. El mismo puede calcularse según la siguiente fórmula:

$$GPR = R_g \cdot I_g \quad (10)$$

En la Tabla 11.6 se presentan los valores del GPR para los tres casos de diseño de la malla de puesta a tierra:

	GPR (V)
SSEE 1 y 2	341
SSEE 3 y 4	341
SSEE 5	492

Tabla 11.6: Valor del GPR para los tres diseños de malla de puesta a tierra

Por lo tanto, se desprende de los valores de las Tablas 11.3 y 11.6 que el GPR resulta ser mayor que la máxima tensión de toque admisible para todos los diseños.

Ahora bien, siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 11.1, se deben calcular las tensiones de Mesh y de Step para poder evaluar si el diseño de la malla es adecuado.

11.10. Cálculo de la tensión de Mesh

La tensión de Mesh se calcula según la siguiente fórmula:

$$E'_M = \frac{\rho_a \cdot I_g \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (11)$$

A continuación se definen y presentan las fórmulas de cálculo de los distintos factores pertenecientes a la ecuación (11):

- ρ_a : resistividad aparente del suelo
- I_g : corriente que circula por la malla de puesta a tierra
- K_i : factor de irregularidad del terreno. El mismo se obtiene de la siguiente fórmula:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (12)$$

en donde $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$ con:

- $n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P}$ siendo L_C la longitud total de conductor horizontal enterrado y L_P la longitud total de la periferia de la malla
- $n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}}$ siendo A el área de la malla
- $n_c = 1$ dado que la malla es rectangular
- $n_d = 1$ dado que la malla es rectangular

Con estas definiciones y dado el diseño de la malla por el cual se optó, se obtienen los siguientes valores:

	n	K_i
SSEE 1 y 2	5,74	1,49
SSEE 3 y 4	5,74	1,49
SSEE 5	4,13	1,26

Tabla 11.7: Valores de n y K_i para los tres diseños de malla de puesta a tierra

- L_M : Longitud efectiva de cobre enterrado. La misma se calcula de la siguiente manera:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (13)$$

siendo L_C la longitud total de conductor horizontal enterrado, L_R la sumatoria de la longitud de las jabalinas enterradas, L_r la longitud unitaria de las jabalinas, L_X la longitud máxima de la malla según el eje X y L_Y la longitud máxima de la malla según el eje Y.

Para los tres diseños de malla de puesta a tierra realizados, el valor de L_M queda de la siguiente manera:

	L_M (m)
SSEE 1 y 2	198,4
SSEE 3 y 4	198,4
SSEE 5	108,2

Tabla 11.8: Valores de L_M para los tres diseños de malla de puesta a tierra

- K_M : Factor geométrico que depende de la separación entre conductores de la malla, de la profundidad de enterrado, del diámetro de los conductores horizontales y de n .

El mismo se halla con la siguiente ecuación:

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right) \right] \quad (14)$$

siendo D la separación entre conductores horizontales, h la profundidad de enterrado de los conductores horizontales, d el diámetro de los conductores horizontales, $K_{ii}=1$ puesto que las mallas de puesta a tierra tienen jabalinas enterradas sobre el perímetro y

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \text{ (con } h \text{ en metros y } h_o=1\text{m)}.$$

Para los tres diseños de malla de puesta a tierra realizados, el valor de K_M queda de la siguiente manera:

	K_M
SSEE 1 y 2	0,749
SSEE 3 y 4	0,749
SSEE 5	0,783

Tabla 11.9: Valores de K_M para los tres diseños de malla de puesta a tierra

Una vez obtenidos todos los valores de los factores de la ecuación (11), quedan determinados los valores de la tensión de Mesh para todos los diseños de malla de puesta a tierra. Los mismos se presentan en la Tabla 11.10.

	E'_M (V)
SSEE 1 y 2	61,5
SSEE 3 y 4	61,5
SSEE 5	99,1

Tabla 11.10: Valores de la tensión de Mesh según la subestación de tracción

En la Tabla 11.11 se muestran las tensiones de Mesh y de toque máxima admisible para las distintas subestaciones de tracción:

	E'_M (V)	E_{T_max} (V)
SSEE 1 y 2	61,5	121
SSEE 3 y 4	61,5	121
SSEE 5	99,1	121

Tabla 11.11: Tensiones de Mesh y de toque máxima admisible según la subestación de tracción

Tal como se desprende de la Tabla 11.11, las tensiones de Mesh calculadas resultan ser, en todos los casos, menores que las tensiones de toque máximas admisibles.

Por lo tanto, continuando con el diagrama de bloques de la Figura 11.1, se procede a calcular la tensión de Step.

11.11. Cálculo de la tensión de Step

La tensión de Step se calcula según la siguiente fórmula:

$$E'_S = \frac{\rho_a \cdot I_g \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} \quad (15)$$

A continuación se definen y presentan las fórmulas de cálculo de los distintos factores pertenecientes a la ecuación (15):

- ρ_a : resistividad aparente del suelo
- I_g : corriente que circula por la malla de puesta a tierra
- K_i : factor de irregularidad del terreno. El mismo fue definido en la Sección 11.10 –Cálculo de la tensión de Mesh
- L_S : Longitud efectiva de cobre enterrado

La longitud efectiva de cobre enterrado se calcula de la siguiente manera:

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (16)$$

siendo L_C la longitud total de conductor horizontal enterrado y L_R la sumatoria de la longitud de las jabalinas enterradas.

Para los tres diseños de malla de puesta a tierra realizados, el valor de L_S queda de la siguiente manera:

	L_S (m)
SSEE 1 y 2	139,2
SSEE 3 y 4	139,2
SSEE 5	74,1

Tabla 11.12: Valores de L_S para los tres diseños de malla de puesta a tierra

- K_S : Factor geométrico que depende de la separación entre conductores de la malla, de la profundidad de enterrado y de n .

El mismo se halla con la siguiente ecuación:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (17)$$

siendo D la separación entre conductores horizontales y h la profundidad de enterrado de los conductores horizontales. Para los tres diseños de malla de puesta a tierra realizados, el valor de K_S queda de la siguiente manera:

	K_S
SSEE 1 y 2	0,206
SSEE 3 y 4	0,206
SSEE 5	0,194

Tabla 11.13: Valores de K_S para los tres diseños de malla de puesta a tierra

Una vez obtenidos todos los valores de los factores de la ecuación (15), quedan determinados los valores de la tensión de Step para todos los diseños de malla de puesta a tierra. Los mismos se presentan en la Tabla 11.14.

	E'_s (V)
SSEE 1 y 2	24,1
SSEE 3 y 4	24,1
SSEE 5	35,9

Tabla 11.14: Valores de la tensión de Step según la subestación de tracción

En la Tabla 11.15 se muestran las tensiones de Step y de paso máxima admisible para las distintas subestaciones de tracción:

	E'_s (V)	E_{S_max} (V)
SSEE 1 y 2	24,1	137
SSEE 3 y 4	24,1	137
SSEE 5	35,9	137

Tabla 11.15: Tensiones de Step y de paso máxima admisible según la subestación de tracción

Tal como se desprende de la Tabla 11.15, las tensiones de Step calculadas resultan ser, en todos los casos, menores que las tensiones de paso máximas admisibles.

Por lo tanto, se concluye que el diseño de las tres mallas de puesta a tierra correspondientes a las diferentes subestaciones de tracción resultan ser adecuados.

Capítulo 12: Estudio Económico

En el presente capítulo se realiza un estudio económico del proyecto, de modo de determinar si la instalación de un sistema de tranvía por la Avenida 18 de Julio es rentable. Se analizarán los costos y beneficios del proyecto.

Este estudio se realiza a 20 años, siendo este período de tiempo la vida útil del equipamiento a instalar.

La metodología utilizada para la elaboración de la evaluación económica se compone de la identificación y valoración de los flujos de capital del proyecto (inversión inicial, costos de funcionamiento e ingresos por venta de boletos).

12.1. Inversión Inicial

Para determinar el monto de las inversiones iniciales necesarias para realizar el proyecto, se cotizaron los distintos elementos de la parte eléctrica, ferroviaria y civil. A continuación se detallan los montos de las inversiones iniciales requeridas en cada una de las secciones (Eléctrica, Ferroviaria, Civil):

12.1.1. Costo de infraestructura eléctrica

Se cotizaron los ítems representados en la Tabla 12.1, donde se resumen los costos de la infraestructura eléctrica:

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (U\$S)	Precio Total (U\$S)
Interruptor Diferencial 4 polos 63A/30mA	5	48,3	345
Interruptor Termomagnético 2 polos 6A	5	9,7	69
Interruptor Termomagnético 2 polos 16A	5	8,3	59
Interruptor Termomagnético 3 polos 6A	5	20,3	145
Interruptor Termomagnético 3 polos 16A	10	17,3	247

Mano de Obra por Tablero	5	450	2.250
Insumos	1	100	143
Celdas de MT	22	9.300	292.286
Mano de Obra por Celda	22	300	9.429
Transformador 3W 2,5/1,5/1,5MVA; 31,5/0,282/0,282kV	5	128.100	915.000
Transformador 2W 16kVA; 31,5/400V	1	624,78	893
Transformador 2W 40kVA; 31,5/400V	2	1.561,94	4.463
Mano de Obra Transformador 3W	5	500	2.500
Mano de Obra Transformador 2W	3	300	900
Cable de Cobre desnudo de 50mm ² (m)	502	6,04	4.332
Jabalina de 2,5m y 5/8"	24	12,55	430
Soldadura Exotérmica	1	2,88	4
Mano de Obra PaT	1	3.000	3.000
Transformador de Corriente BT	1	---	4.457
Transformador de Corriente MT	1	---	774.843
Rectificador	5	128.100	915.000
DC Switch	20	32.025	915.000
Inversor	5	128.100	915.000
Luminarias	20	33,61	960
Luminarias de Emergencia	20	33,61	960
Gabinete Tablero SSAA	5	549,63	3.926
Medidor Universal	10	652,5	9.321
Fusible 2A	30	231,8	9.934
Rectificador p/baterías y Bco. de Baterías	5	94,75	677
Cable Al XLPE 1x25mm ²	123	0,86	151
Cable Al XLPE 1x35mm ²	258	1,1	405
Cable Cu PVC 3x1,5mm ²	40	0,8	46
Cable Cu PVC 4x1,5mm ²	13.7	1,03	20
Cable Cu PVC 3x4mm ²	65	2,5	232
Cable Cu PVC 4x4mm ²	13.7	3	59
Cable Cu PVC 5x4mm ²	6	3,75	32
Cable Cu PVC 5x16mm ²	25.4	15,2	552
Cable Cu EPR 1x400mm ²	1410	1.128,89	2.273.910
Total Eléctrico			7.061.980

Tabla 12.1: Costos de infraestructura eléctrica

12.1.2. Costo de infraestructura ferroviaria

A continuación, en la Tabla 12.2, se presentan los costos de infraestructura ferroviaria cotizados:

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (U\$S)	Precio Total (U\$S)
Tranvía	21	2.634.660	55.327.869
Costo de Importación	21	790.398	16.598.361
Vías (m)	10.522	13.618.300	143.291.753
Catenarias (m)	10.522	888.150	9345.114
Señalización y control	11	1.197.239	13.169.630
Total Ferroviario			237.732.726

Tabla 12.2: Costos de infraestructura ferroviaria

Respecto a la cotización por cada tranvía, se estima que el costo de importación podría ser de un 30% del precio de cada tranvía. Dentro del Ítem “Vías” se encuentran, tanto las vías propiamente dichas, como la colocación de las mismas. Las catenarias se cotizaron por metro, donde también se incluye la colocación de las mismas. Se agregó un ítem que reúne tanto las señalizaciones como el control necesario para los semáforos y la correcta circulación de los tranvías.

12.1.3. Costo de infraestructura civil

En la Tabla 12.3 se presentan los costos obtenidos al cotizar la obra civil de la construcción de una subestación de tracción:

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (U\$S)	Precio Total (U\$S)
Subestación	5	92.584	462.920
Rampas, desniveles, etc.	5	46.292	231.460
Total Civil			694,380

Tabla 12.3: Costos de infraestructura civil

12.1.4. Costo de diseño e ingeniería

Por concepto de ingeniería, estudios de diseño, dirección de proyecto, entrenamiento, realización de pruebas, etc., se considera un 5% del total de los costos de inversión, resultando en un monto:

$$\text{Costo de diseño e ingeniería} = \text{U\$}12.274.454$$

12.1.5. Resumen de la Inversión Inicial

En la Tabla 12.4 se presenta un resumen de los costos iniciales de cada sección:

Descripción	Precio Total (U\$S)
Costo Eléctrico	7.061.980
Costo Ferroviario	237.732.726
Costo Civil	694.380
Costo de Diseño e Ingeniería	12.274.454
Total	257.763.541

Tabla 12.4: Costo Total y costos por sección

12.2. Costos de Funcionamiento

En el documento Técnico del Banco Mundial N°52S se detallan algunos procedimientos para la determinación de los costos de transporte colectivo para países en desarrollo. En particular, se especifica que los costos de funcionamiento para el caso de ferrocarriles livianos pueden calcularse mediante la aplicación de los valores para:

- **Costos relacionados con la distancia:** energía, mantenimiento y reparación de los tranvías, etc. Estos corresponden al total de distancias recorridas por la flota, y se expresan en unidades de vehículo-kilómetro.
- **Costos relacionados con el tiempo:** principalmente salarios del personal de operaciones medidos según el número total de horas que la flota de tranvías está en movimiento. Se expresan en vehículos-hora.

- **Costos relacionados con la ruta:** por ejemplo, el mantenimiento de las vías, líneas de electricidad, señales y estaciones, expresados en costo diario, por kilómetro de ruta.

El informe prevé que los costos unitarios de estos elementos en los países en desarrollo de América Latina estén comprendidos entre los siguientes valores:

Costos (U\$S)	Ferrocarril Liviano
Costos relacionados con la distancia, por vehículo-km	1,00 – 1,50 U\$S
Costos relacionados con el tiempo, por vehículos-hora	8 – 12 U\$S
Costos diarios relacionados con la ruta, por km de ruta	150 – 250 U\$S

Tabla 12.5: Costos unitarios según Banco Mundial

Para el estudio se consideran los valores límites superiores tanto de los costos relacionados con el tiempo como de los costos relacionados con la ruta.

Sin embargo, para los costos relacionados con la distancia, debido a que implica un costo sobre la energía consumida, se realiza un cálculo de los costos más fiel a la realidad.

12.2.1. Costo relacionado con la ruta

Considerando el máximo costo relacionado con la ruta, por km de ruta, según la Tabla 12.5, $Costo/km = U\$250$, y teniendo en cuenta que el recorrido que realiza cada tranvía es un circuito cerrado de 10,5km por vuelta, se obtiene el Costo Diario estimado: $CostoDiario = U\$2.625$

Mediante el Costo Diario se estima el Costo Anual:

$$\text{Costo Anual} = U\$958.125$$

En la siguiente tabla se resumen los cálculos anteriormente mencionados:

Costo relacionado con la ruta/ km de ruta (U\$S)	250
Distancia de ruta (km)	10,5
Costo Diario (U\$S)	2.625
Costo Anual (U\$S)	958.125

Tabla 12.6: Costo relacionado con la ruta

12.2.2. Costo relacionado con el tiempo

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 7.2 (Capítulo 7: Frecuencia de Paso y Potencia de las Subestaciones), la cantidad de tranvías que hacen el recorrido completo por día resulta ser la suma del número de tranvías necesarios por hora. Por lo tanto: $N^{\circ} \text{ detranvías por día} = 228$

De donde se obtiene que: $N^{\circ} \text{ detranvías por año} = 83.220$

Considerando el máximo costo relacionado con el tiempo, por vehículos-hora, según la Tabla 12.5, $\text{Costo/vehículo} - \text{hora} = U\12 , se obtiene el Costo Anual estimado: $\text{Costo Anual} = U\$998.640$.

En la siguiente tabla se resumen las cuentas realizadas:

Tranvías por día	228
Tranvías por año	83.220
Costos relacionados con el tiempo, por vehículos-hora (U\$S)	12
Costo Anual (U\$S)	998.640

Tabla 12.7: Costo relacionado con el tiempo

12.2.3. Costo relacionado con la distancia

Teniendo en cuenta nuevamente los datos de la Tabla 7.2, la cantidad de kilómetros que recorren los tranvías al día se calcula de la siguiente manera:

$$km/día = \Sigma(N^{\circ}tranvías/hora_i \cdot \frac{60min}{28min} \cdot 10,5km) = 5.130km$$

Por lo tanto, la distancia recorrida por los tranvías en un año resulta ser:

$$km/año = km/día \cdot 365 = 1.872.450km$$

Considerando el máximo costo relacionado con la distancia, por vehículos-km, según la Tabla 12.5, $Costo/vehículos - km = U\$1,5$, se obtiene el Costo Anual estimado: $CostoAnual = U\$2.808.675$

En la siguiente tabla se resumen las cuentas realizadas:

km por día	5.130
Km por año	1.872.450
Costos relacionados con la distancia, por vehículos-km (U\$)	1,5
Costo Anual (U\$)	2.808.675

Tabla 12.8: Costo relacionado con la distancia

Como se poseen datos sobre el costo de la energía, se calcula el Costo Anual de una manera más fiel a la realidad.

Debido al elevado consumo que tienen los tranvías, según el pliego tarifario vigente de UTE, se debe aplicar una tarifa de grandes consumidores. Por lo tanto, para el cálculo del costo del consumo de energía, se supone dicha tarifa, que se adjunta en la siguiente tabla:

Tarifa	Nivel de tensión kV	Precio de energía \$/ kWh			Potencia máxima medida \$/ kW	Cargo Fijo mensual \$
		Valle	Llano	Punta		
GC1	0,230 - 0,400	1,158	2,221	6,832	290,00	8507,00
GC2	6,4 - 15 - 22	1,138	2,106	5,453	190,00	8507,00
GC3	31,5	1,127	2,089	4,667	119,40	8507,00
GC4	63	1,127	2,089	4,377	51,50	8507,00
GC5 *	110 - 150	1,126	2,076	3,619	36,40	8507,00

Tabla 12.9: Pliego Tarifario de UTE vigente desde el 24/09/2012 (p.7)

La tarifa considerada es la GC3 debido al nivel de tensión en el que se alimentan las subestaciones de tracción. Se consideran como períodos horarios únicamente los del caso de la hora oficial habitual, que son:

- Valle: de 00:00 a 07:00
- Llano: de 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 00:00
- Punta: de 18:00 a 22:00

A continuación se presenta el cálculo del costo de alimentación, teniendo en cuenta los valores de energía consumidos en los distintos horarios:

	Valle	Llano	Punta	TOTAL
Energía diaria (kWh)	5.995	89.380	28.885	124.260
Porcentaje (%)	4,82	71,96	23,25	100
Energía por Año (kWh)	1.885.591,18	28.112.450,34	9.085.121,15	39.083.163
Precio Unitario (\$/kWh)	1,127	2,089	4,667	
Total Costo Energía (U\$S)	101.193	2.796.519	2.019.060	4.916.773
Cargo Potencia Máxima/mes (\$/kW)				119,4
Potencia (kW)				12.500
Total Cargo por Potencia (U\$S)				852.857
TOTAL COSTO Alimentación (U\$S)				5.769.630

Tabla 12.10: Costo relacionado con la alimentación

Por otro lado se debe estimar el costo de mantenimiento, al cual se le asigna, como norma, el 1,5% del costo total de los tranvías, dando como resultado que el Costo de Mantenimiento es de U\$S829.918 por año. Por lo tanto:

Costo Alimentación (U\$S)	5.769.630
Costo Mantenimiento (U\$S)	829.918
TOTAL (U\$S)	6.599.548

Tabla 12.11: Costo relacionado con la distancia

Comparando los costos relacionados con la distancia calculados según los valores de la Tabla 12.5 y el costo calculado a partir de la energía consumida por los tranvías, se aprecia una diferencia de poco menos de U\$S4.000.000, siendo mayor el costo calculado según la energía consumida.

Por lo tanto, para continuar el estudio se toma el costo relacionado con la distancia calculado a partir de la energía consumida. Esto no solo implica considerar un peor caso (ya que este costo es mayor), sino que además se aproxima más a la realidad, ya que se conoce la energía consumida por año por parte de los tranvías.

12.2.4. Resumen de los Costos de Funcionamiento

En la Tabla 12.12 se reúnen los costos de funcionamiento:

Ítem	Precio Total (U\$S)
Costo relacionado con la Ruta	958,125
Costo relacionado con el Tiempo	998,640
Costo relacionado con la Distancia	6,599,548
Total	8,556,313

Tabla 12.12: Costos de funcionamiento

12.3. Estudio de Ingresos

En base a la cantidad de boletos vendidos por Avenida 18 de Julio el día Jueves 8 de Marzo de 2012 (ver Tabla 4.7 – Energía consumida por el tranvía en una semana), se estima la venta de boletos por semana utilizando los coeficientes calculados en dicha tabla, para luego hacer el cálculo de venta de boletos por año.

En la Tabla 12.13 se presentan los cálculos efectuados:

Día	C_i	Venta de Boletos
Lunes	0,98318013	135.115
Martes	0,97472315	133.953
Miércoles	1,02448784	140.792
Jueves	1	137.426
Viernes	1,028079610	141.285
Sábado	0,614548484	84.455
Domingo	0,40701126	55.934
TOTAL Semanal		828.960
TOTAL Anual		43.224.343

Tabla 12.13: Venta de Boletos Anual

Fijando el precio del boleto en U\$S0,5 (la mitad aproximadamente del precio del boleto urbano actual), el ingreso por concepto de venta de boletos es de U\$S21.612.171 al año.

Precio Boleto (U\$S)	Ingreso por venta de boletos (U\$S)
0,5	21.612.171

Tabla 12.14: Ingreso por venta de Boletos Anual

Se considera que durante los primeros 10 años el aumento año a año de la venta de boletos sería de un 7,5%, mientras que el aumento en los últimos 10 años sería del 5%. En la Tabla 12.15 se muestra lo mencionado anteriormente, en un lapso de 20 años.

12.4. Evaluación y resultados

12.4.1. Criterios de evaluación

Los conceptos de costo y valor llevan del aspecto físico de la inversión al aspecto económico. El mismo resulta fundamental en la comparación de un beneficio futuro con un costo inmediato. Para la evaluación económica, tendremos que analizar una serie de ingresos y egresos futuros, con la premisa que un peso disponible actualmente y un peso disponible dentro de veinte años constituyen dos bienes económicos diferentes.

Para resolver la dificultad de compararlos y sumarlos se recurre a un sistema de precios, siendo la tasa de interés el precio que juega el papel fundamental en los problemas de inversión. La tasa de interés es el vínculo entre el presente y el futuro, mientras que el bien invertido es el vínculo físico.

La tasa de interés es la razón entre la ganancia producida por una inversión y la inversión misma sobre un periodo de tiempo dado, generalmente un año. La justificación de la tasa de interés se basa en el hecho concreto de que los bienes tienen un valor en el tiempo.

Así que “un peso de hoy” se cambia por “ $1 + i$ pesos en un año”, donde i es la tasa de interés y es positivo en la mayoría de los casos. Existe entonces la posibilidad de establecer una equivalencia en el tiempo en el sentido que un peso de hoy equivale a $1+i$ pesos dentro de un año.

De ello resulta entonces que un peso dentro de un año equivale a $\frac{1}{1+i}$ pesos de hoy.

Por lo tanto, una serie B conformada por elementos $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$, tendrá un valor actual (VA_B):

$$VA_B = B_0 + \frac{B_1}{(1+i)} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

La actualización tiene este carácter fundamental, que procede del futuro hacia el presente, es decir, en sentido inverso al curso del tiempo. Así, el valor de un bien duradero aparece como el valor actualizado de los ingresos netos que producirá en el futuro.

Al reducir la serie de valores futuros a un solo valor, la actualización resuelve el problema del orden de preferencia entre las mismas. Esta técnica de actualización permite comparar series de capitales (tanto de ingresos como de gastos) que, por sentido común, no es posible clasificar los unos con relación a los otros debido al diferente ritmo temporal de los mismos.

12.4.2. Criterio de decisión

Para analizar los resultados del proyecto se utiliza el criterio de Valor Actual Neto (VAN). Tal como se muestra en la ecuación (2), el VAN de un flujo de valores es:

$$VAN = \sum_{j=0}^{j=n} \frac{B_j}{(1+r)^j} \quad (2)$$

donde r es la tasa de descuento.

La inversión o el proyecto es rentable si los beneficios actualizados superan los costos actualizados, es decir que el VAN sea mayor a 0.

En la evaluación del proyecto también se utilizan dos indicadores más:

- a) TIR: es la determinación de la tasa de interés que hace que el VAN sea igual a 0
- b) Período de Repago: es el período de tiempo en que el proyecto repaga la inversión inicial. Normalmente se utilizan criterios simplificadores para este indicador, donde se ignora el factor tiempo del dinero.

12.4.3. Resultados obtenidos

Hipótesis asumidas:

- a) La tasa de descuento utilizada para el cálculo del VAN será del 12% (valor normalmente utilizado para proyectos de riesgo medio).
- b) Los valores de los beneficios y costos son en dólares americanos constantes al año 2012.
- c) Se toma como año base el año 2012.
- d) Tiempo de evaluación del proyecto: 10 años.

En resumen, en la Tabla 12.15 se muestran los valores de los beneficios calculados para el proyecto en cada año.

AÑO	Costo Inicial	Costo Funcionamiento	Ingresos	Ingreso-Costo
0	-257.763.541	0	0	-257.763.541
1	0	-8.556.313	21.612.171	13.055.858
2	0	-8.556.313	23.233.084	14.676.771
3	0	-8.556.313	24.975.566	16.419.253
4	0	-8.556.313	26.848.733	18.292.420
5	0	-8.556.313	28.862.388	20.306.075
6	0	-8.556.313	31.027.067	22.470.754
7	0	-8.556.313	33.354.097	24.797.784
8	0	-8.556.313	35.855.654	27.299.341
9	0	-8.556.313	38.544.829	29.988.515
10	0	-8.556.313	41.435.691	32.879.378
11	0	-8.556.313	43.507.475	34.951.162
12	0	-8.556.313	45.682.849	37.126.536
13	0	-8.556.313	47.966.991	39.410.678
14	0	-8.556.313	50.365.341	41.809.028
15	0	-8.556.313	52.883.608	44.327.295
16	0	-8.556.313	55.527.788	46.971.475
17	0	-8.556.313	58.304.178	49.747.865
18	0	-8.556.313	61.219.387	52.663.074
19	0	-8.556.313	64.280.356	55.724.043

20	0	-8.556.313	67.494.374	58.938.061
----	---	------------	------------	------------

Tabla 12.15: Costos e ingresos por año

El valor del VAN resulta ser: $VAN = U\$S - 57.987.599$

La TIR es de: $TIR = 8,7\%$

Años de repago

Se presenta en la siguiente tabla la evolución para el cálculo de los años de repago:

Año	Ingreso-Costo	Acumulado
0	-257.763.541	-257.763.541
1	13.055.858	-244.707.683
2	14.676.771	-230.030.912
3	16.419.253	-213.611.659
4	18.292.420	-195.319.239
5	20.306.075	-175.013.164
6	22.470.754	-152.542.410
7	24.797.784	-127.744.626
8	27.299.341	-100.445.285
9	29.988.515	-70.456.769
10	32.879.378	-37.577.391
11	34.951.162	-2.626.229
12	37.126.536	34.500.307
13	39.410.678	73.910.985
14	41.809.028	115.720.013
15	44.327.295	160.047.308
16	46.971.475	207.018.783
17	49.747.865	256.766.648
18	52.663.074	309.429.721
19	55.724.043	365.153.764
20	58.938.061	424.091.825

Tabla 12.16: Evolución para el cálculo de los años de repago

Se desprende de la Tabla 12.16 que, entre el año 11 y el año 12, se recuperaría la inversión inicial.

Ahora bien, realizando el mismo análisis (considerando las mismas hipótesis) pero ahora con un precio del boleto de U\$S1,0 (aproximadamente el valor actual del boleto de autobús), el ingreso por concepto de venta de boletos es de U\$S43.224.343 al año.

Precio Boleto (U\$S)	Ingreso por venta de boletos (U\$S)
1,0	43.224.343

Tabla 12.17: Ingreso por venta de Boletos Anual a U\$S1

En la Tabla 12.18 se muestran los valores de los beneficios calculados para el proyecto en cada año.

AÑO	Costo Inicial	Costo Funcionamiento	Ingresos	Ingreso-Costo
0	-257.763.541	0	0	-257.763.541
1	0	-8.556.313	43.224.343	34.668.030
2	0	-8.556.313	46.466.169	37.909.856
3	0	-8.556.313	49.951.131	41.394.818
4	0	-8.556.313	53.697.466	45.141.153
5	0	-8.556.313	57.724.776	49.168.463
6	0	-8.556.313	62.054.134	53.497.821
7	0	-8.556.313	66.708.194	58.151.881
8	0	-8.556.313	71.711.309	63.154.996
9	0	-8.556.313	77.089.657	68.533.344
10	0	-8.556.313	82.871.381	74.315.068
11	0	-8.556.313	87.014.950	78.458.637
12	0	-8.556.313	91.365.698	82.809.385
13	0	-8.556.313	95.933.983	87.377.670
14	0	-8.556.313	100.730.682	92.174.369
15	0	-8.556.313	105.767.216	97.210.903
16	0	-8.556.313	111.055.577	102.499.264
17	0	-8.556.313	116.608.356	108.052.043
18	0	-8.556.313	122.438.773	113.882.460
19	0	-8.556.313	128.560.712	120.004.399
20	0	-8.556.313	134.988.748	126.432.435

Tabla 12.18: Costos e ingresos por año con un precio del boleto de U\$S1

El valor del VAN resulta ser: $VAN = U\$S171.234.122$

La TIR es de: $TIR = 20,0\%$

Años de repago

Se presenta en la siguiente tabla la evolución para el cálculo de los años de repago:

Año	Ingreso-Costo	Acumulado
0	-257.763.541	-257.763.541
1	34.668.030	-223.095.511
2	37.909.856	-185.185.656
3	41.394.818	-143.790.838
4	45.141.153	-98.649.685
5	49.168.463	-49.481.222
6	53.497.821	4.016.599
7	58.151.881	62.168.481
8	63.154.996	125.323.477
9	68.533.344	193.856.820
10	74.315.068	268.171.889
11	78.458.637	346.630.526
12	82.809.385	429.439.911
13	87.377.670	516.817.581
14	92.174.369	608.991.949
15	97.210.903	706.202.852
16	102.499.264	808.702.116
17	108.052.043	916.754.159
18	113.882.460	1.030.636.619
19	120.004.399	1.150.641.018
20	126.432.435	1.277.073.453

Tabla 12.19: Evolución para el cálculo de los años de repago con el boleto a U\$S1

Se desprende de la Tabla 12.19 que, entre el año 5 y el año 6, se recuperaría la inversión inicial.

Conclusiones

Basándose en el estudio realizado, se puede concluir que el flujo de pasajeros por hora y por sentido por Avenida 18 de Julio resulta ser adecuado para la implementación de un tranvía eléctrico sobre dicha avenida.

La implementación de este sistema de transporte implicaría un aumento de la velocidad media del tránsito, ya que la misma correspondiente al tranvía es de 35km/h, mientras que, hoy en día, la velocidad promedio registrada en el Centro de la ciudad es entre 6km/h y 8km/h. A su vez, no solo se aumentaría la velocidad media de circulación, sino que además se estaría evitando la emisión anual aproximada de 9.746 toneladas de CO₂, en el caso de que las personas comiencen a utilizar este nuevo medio de transporte en vez de viajar en autobús. Existen estudios que demuestran que, en los lugares en donde se implementó un tranvía, comenzó a aumentar la gente que lo utiliza a medida que pasa el tiempo, con lo cual lo anteriormente mencionado podría transformarse en un hecho.

Por otro lado, no solo se estaría reduciendo la emisión de CO₂, contribuyendo con el Medio Ambiente, sino que, a su vez, se estaría reduciendo el nivel sonoro de la zona de estudio, ya que el tránsito urbano produce un nivel sonoro de 90dB, mientras que el que produce el tranvía es de 68dB, siendo 70dB el umbral de daño auditivo de las personas. De este modo se estaría favoreciendo no solo a la gente que utilizaría dicho medio de transporte, sino también a los peatones y a los vecinos de la zona.

Dado que, en principio, la inclusión del sistema propuesto no implica incrementar la generación actual de energía del Uruguay, la energía con la que se alimenta el tranvía sería energía limpia, es decir, proveniente de fuentes renovables, disminuyendo aún más la contaminación ambiental (de nada sirve implementar un sistema de transporte eléctrico si a fin de cuentas se emite CO₂ en la generación de electricidad para el mismo). La energía consumida por el tranvía es de 39.083.162kWh, lo que equivale a 3.360 tep, mientras que en la actualidad los autobuses en Montevideo consumen 49.790 tep (579.057.700kWh) y los automóviles en Montevideo consumen 127.120 tep (1.478.405.600kWh). Por lo tanto, en principio podría suponerse que se

estaría ahorrando energía con la implementación del sistema de transporte propuesto. Y todo esto sin tener en cuenta que el tranvía aporta a la red un 15% de su consumo energético anual debido al frenado regenerativo (correspondiente a 5.862.474kWh).

Los automóviles resultan ser mucho menos eficaces que el resto de los medios de transporte en las ciudades en relación a la capacidad de transporte según el espacio que ocupan (sin tener en cuenta el espacio que ocupan cuando permanecen estacionados). Un desplazamiento diario en automóvil entre el domicilio y el lugar de trabajo ocupa 20 veces más espacio que el mismo trayecto realizado en tranvía. Por lo tanto, al implementar el tranvía se reduce el espacio ocupado en la calzada. Teniendo en cuenta este último punto, se podría pensar en realizar algún proyecto turístico o afín, así como también algún proyecto urbanístico/paisajístico, de modo de aumentar el atractivo de la zona y, posiblemente, aumentar el flujo de turistas en Montevideo, de forma tal que ayude a contribuir con la economía de la zona.

A su vez, el descongestionamiento de las calles se traduciría en un aumento de la seguridad vial, ya que la cantidad de accidentes de tránsito se reduciría drásticamente.

Como suele suceder en toda transición, puede parecer que la misma será dificultosa. Sin embargo, la experiencia internacional demuestra que la cantidad de personas que comienzan a utilizar este medio de transporte aumenta con el correr del tiempo.

De acuerdo a los flujos de carga y a las curvas de carga y demanda realizadas, se concluye que la implementación del tranvía no afecta en gran medida al sistema eléctrico actual de la zona de estudio ni al sistema general del Uruguay. Por lo tanto, no resulta necesario realizar mayores cambios en la red eléctrica actual para alimentar este sistema de transporte, tanto en condiciones normales como en condiciones de falta.

Con los resultados obtenidos del estudio económico para el proyecto con un valor del boleto de U\$S0,5 se puede apreciar que el mismo no resulta rentable, dado que el VAN es negativo y la TIR (8,7%) es muy inferior a las tasas normales que cobran las entidades financieras para realizar financiamientos de proyectos (aproximadamente entre 13% y 15%). Sin embargo, realizando el mismo estudio bajo las mismas

condiciones pero para un valor del boleto de U\$1,0 se obtiene un valor de TIR del 20%, siendo posible de esta manera obtener un préstamo bancario para financiar el proyecto. A su vez, el valor del VAN resulta ser positivo, recuperándose la inversión inicial entre el quinto y el sexto año de comienzo del proyecto.

Considerando todas las conclusiones anteriormente mencionadas, se puede decir que el proyecto resulta viable y, de concretarse, aportaría un gran atractivo para la ciudad de Montevideo por todas las ventajas que este medio de transporte presenta.

$$U_{dA} = \frac{U_d}{2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{UV} - \frac{3}{\pi} \cdot (X_{CC} + X) \cdot I_d - R \cdot I_d \quad (1)$$

$$U_{dB} = \frac{U_d}{2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{XY} - \frac{3}{\pi} \cdot (X_{CC} + X) \cdot I_d - R \cdot I_d \quad (2)$$

En donde X_{CC} corresponde a la impedancia de cortocircuito del transformador, R y X son la resistencia y la reactancia de los conductores de conexión respectivamente, e I_d es la corriente que circula por el lado de continua del rectificador de 12 pulsos, la cual coincide con la corriente que circula por cada uno de los rectificadores de 6 pulsos. Los conductores de conexión de los rectificadores de 6 pulsos a cada secundario del transformador deberán ser de la misma sección y del mismo largo, de modo que puedan ser considerados como dos rectificadores iguales y sea válido el razonamiento que sigue.

Igualando las tensiones de salida de cada rectificador de 6 pulsos, se debe cumplir que $U_{UV}=U_{XY}$.

Sea U_1 la tensión entre fases del primario y U_2 la tensión entre fases de los secundarios. Entonces las relaciones de vueltas del transformador deben ser:

$$\frac{\left(\frac{U_1}{\sqrt{3}}\right)}{N} = \frac{\left(\frac{U_2}{\sqrt{3}}\right)}{N_1} \rightarrow \frac{N_1}{N} = \frac{U_2}{U_1} \quad (3)$$

$$\frac{\left(\frac{U_1}{\sqrt{3}}\right)}{N} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow \frac{N_2}{N} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} \quad (4)$$

Efecto del lado de alterna: Corriente de Fase

Las corrientes de fase de entrada a los convertidores forman dos sistemas simétricos desfasados 30° entre sí (ver Figura 1). En cada nudo del triángulo se obtiene lo siguiente:

$$i_u = i'_R - i'_T \quad i_v = i'_S - i'_R \quad i_w = i'_T - i'_S \quad (5)$$

Suponiendo que se tiene un transformador trifásico de flujos ligados, se puede utilizar la ecuación generalizada para este tipo de transformador:

$$N_P \cdot i_{Pk} + N_S \cdot i_{Sk} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{m=1}^{m=3} (N_P \cdot i_{Pm} + N_S \cdot i_{Sm}) \quad (6)$$

- k=1, 2 y 3
- i_p : Corrientes entrantes en el primario
- i_s : Corrientes entrantes en el secundario

Si se aplica la ecuación (6) en una fase del transformador, y teniendo en cuenta que el mismo consta de dos secundarios, se puede calcular el valor de la corriente por la fase R, como se muestra a continuación:

$$\text{Fase 1: } N \cdot i_R - N_2 \cdot i'_R - N_1 \cdot i''_R = \frac{1}{3} \cdot \sum_{m=1}^{m=3} (N \cdot i_{Pm} - N_2 \cdot i'_{Sm} - N_1 \cdot i''_{Sm}) \quad (7)$$

$$\text{En los bobinados estrella: } \sum_{m=1}^{m=3} (N \cdot i_{Pm}) = \sum_{m=1}^{m=3} (-N_1 \cdot i''_{Sm}) = 0 \quad (8)$$

$$\text{Por lo que: } N \cdot i_R - N_2 \cdot i'_R - N_1 \cdot i''_R = \frac{1}{3} \cdot (-N_2 \cdot i'_R - N_2 \cdot i'_S - N_2 \cdot i'_T) \quad (9)$$

$$\text{Operando: } N \cdot i_R - N_1 \cdot i''_R = \frac{1}{3} \cdot N_2 \cdot (i'_R - i'_S + i'_R - i'_T) \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (10) se tiene:

$$N \cdot i_R - N_1 \cdot i''_R = \frac{1}{3} \cdot N_2 \cdot (i_u - i_v) \quad (11)$$

Despejando i_R y sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$i_R = \frac{N_1}{N} \cdot i_X + \frac{1}{3} \cdot \frac{N_2}{N} \cdot (i_u - i_v) = \frac{U_2}{U_1} \cdot i_X + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot (i_u - i_v) \quad (12)$$

Finalmente, despejando adecuadamente se obtiene la ecuación de la corriente por la fase R:

$$i_R = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot i_X + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot (i_u - i_v) \right] \quad (13)$$

De la ecuación (13) y considerando que las corrientes involucradas son señales con formas cuasi-cuadradas desfasadas ángulos conocidos, se puede construir la forma de onda de la corriente de la fase R en el primario del transformador. Esta forma de onda se puede apreciar en la Figura 2, la cual ha sido construida considerando $U_1=2 \cdot U_2$. Vale aclarar que no ha sido tenido en cuenta el ángulo de conmutación. Si se incluyera su efecto, los saltos de corriente se suavizarían un poco, ya que la amplitud de los armónicos de corriente se reduce.

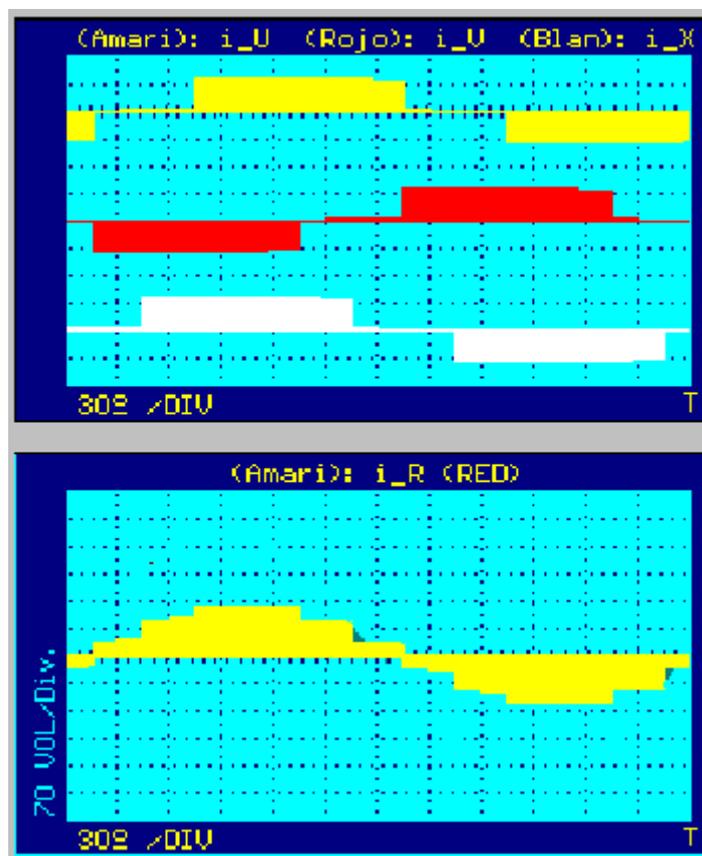


Figura 2: Corrientes i_U , i_v e i_X (arriba) y corriente de fase i_R (abajo)

Cálculo de los armónicos de corriente

Sabiendo que i_v está retrasada 120° respecto de i_U , que a su vez está también retrasada 30° respecto de i_X , y utilizando las propiedades de Fourier del retardo y la combinación lineal, el resultado que se obtiene es el siguiente:

$$I_R(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[I_X(n) + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_U(n) \cdot \left(1 - e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot n} \right) \right] \quad (14)$$

$$I_R(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{I_X(n)}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6} \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot n} \right) \right] \quad (15)$$

La ecuación (15) se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_R(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{I_X(n)}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6} \cdot n} \cdot (1 - a^{-n}) \right] \text{ con } a = e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \quad (16)$$

Teniendo en cuenta que:

$$1 - a^{-n} = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 3 \\ \sqrt{3} \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}} & \text{si } n = 3 + 1 \\ \sqrt{3} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}} & \text{si } n = 3 + 2 \end{cases}$$

Se obtiene el contenido armónico de la corriente de fase R por el primario del transformador:

$$I_R(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{I_X(n)}{2} \cdot \left[1 + e^{-j \cdot \frac{\pi}{6} \cdot (n \pm 1)} \right] \text{ para } n \neq 2, n \neq 3 \quad (17)$$

Para valores de n pares y múltiplos de 3, se tiene que $I_X(n)=0$ (onda cuasi-cuadrada), con lo cual el armónico de la corriente de fase R por el primario del transformador es nulo.

Armónicos nulos:

$$\text{Si: } \frac{\pi}{6} \cdot (n \pm 1) = (2 \cdot k + 1) \cdot \pi \rightarrow n = 12 \cdot k + 6 \pm 1 \rightarrow n = 5, 7, 17, 19 \dots \quad I_R(n) = 0$$

Armónicos no nulos:

$$\text{Si: } \frac{\pi}{6} \cdot (n \pm 1) = 2 \cdot k \cdot \pi \rightarrow n = 12 \cdot k \pm 1 \rightarrow n = 1, 11, 13 \dots \quad I_R(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot I_X(n)$$

Este resultado muestra que con este montaje se eliminan, además de otros armónicos, los armónicos 5 y 7, quedando recién como primeros armónicos el 11 y el 13.

Corriente primaria

Utilizando la Igualdad de Parseval: $I_{Reff} = \sqrt{\sum_0^{\infty} I_{Reff}(n)^2}$ y sabiendo que $I_X(t)$ es una onda cuasi-cuadrada, se puede determinar el valor eficaz de la corriente que circula por el primario del transformador:

$$I_{Reff}(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot I_{Xeff}(n) = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{n \cdot \pi} \cdot I_d \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{3}\right) \text{ si } n = 12 \cdot k \pm 1 ; k \in Z$$

donde I_d es el valor medio de la corriente que circula a la salida del rectificador.

Ahora bien, para $n = 12 \cdot k \pm 1 ; k \in Z$, se cumple que: $\left| \sin\left(n \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right| = \frac{\sqrt{3}}{2}$

Por lo tanto, queda determinado el valor eficaz de la corriente del primario:

$$I_{Reff} = \sqrt{\sum_0^{\infty} I_{Reff}(n)^2} = \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \cdot \sqrt{\sum_0^{\infty} \left(\frac{1}{n}\right)^2} \text{ con } n = 12 \cdot k \pm 1 ; k \in Z \quad (18)$$

Tomando los primeros 100 valores de k , y teniendo en cuenta que

$$I_d = \frac{P_{DC}}{U_d} = \frac{2.2MW}{750V} \cong 2933.3A, \text{ el valor eficaz de la corriente } I_R \text{ vale:}$$

$$I_{Reff} \cong \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot 2313,3A \quad (19)$$

Resta determinar la tensión entre fases en los secundarios del transformador de 3 bobinados para obtener así el valor eficaz de la corriente primaria.

Efecto del lado de continua: Tensión de salida

En la salida del convertidor de 12 pulsos dos vías se tiene una tensión continua $u_d(t)$ que es la suma de las tensiones instantáneas de dos convertidores de 6 pulsos dos vías desfasados 30° .

El período de la componente de alterna de cada convertidor es 60° , lo cual equivale a una fundamental de 300Hz. Al sumar las dos tensiones, las fundamentales de las componentes de alterna se anulan (están desfasadas medio período) y $u_d(t)$ queda compuesta por:

- Un valor medio $U_d=U_{dA}+U_{dB}$
- Una componente de alterna $u_d(t)-U_d$ de período 30° y armónicos de frecuencias $12 \cdot n \cdot f_o$, esto es 600Hz para una frecuencia de red de 50Hz

Dado que $U_d=U_{dA}+U_{dB}$, de las ecuaciones (1) y (2) se obtiene el valor medio de la tensión de salida del rectificador de 12 pulsos:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot 2 \cdot U_2 - \frac{6}{\pi} \cdot (X_{CC} + X) \cdot I_d - 2 \cdot R \cdot I_d \quad (20)$$

Determinación de la tensión compuesta secundaria

El tranvía será alimentado con una tensión continua de 750V. Por lo tanto, sabiendo que $P_{DC}=U_d \cdot I_d$ y que $X_{CC} = u_{CC} \cdot \frac{(U_2)^2}{S_{TRAFO}}$, operando en la ecuación (20) se puede despejar la tensión secundaria:

$$(U_2)^2 - \left(\frac{S_{TRAFO} \cdot \sqrt{2}}{u_{CC} \cdot I_d} \right) \cdot U_2 + \frac{S_{TRAFO} \cdot \pi}{3 \cdot u_{CC}} \cdot \left(\frac{U_d}{2 \cdot I_d} + R \right) = 0 \quad (21)$$

Para poder resolver la ecuación (21) hace falta conocer los valores de la resistencia y la reactancia del cable de conexión a utilizar entre el transformador de 3 arrollamientos y el rectificador de 12 pulsos.

Determinación del cable de conexión entre los arrollamientos secundarios del transformador y el rectificador

Sabiendo que $I_{Xeff} \cong 2313,3A$, se puede determinar la sección del cable a utilizar por medio del criterio de corriente admisible.

Del catálogo de cables de baja tensión empleado se obtienen los valores de corriente admisible según la sección del conductor, los cuales se presentan en la Tabla 1. Dado que los cables de baja tensión van a ir por bandeja, se tomaron los valores de corriente admisible suponiendo tres cables unipolares agrupados, instalados al aire. Los cables de baja tensión que se utilizarán son de cobre, aislados con etileno propileno (EPR).

Sección (mm ²)	Corriente Admisible (A)
240	515
300	595
400	700

Tabla 1: Corriente admisible del conductor según la sección del mismo

Dado que la corriente que circulará por el conductor es elevada, se deberán utilizar varias ternas de cables unipolares. En la Tabla 2 se calcula la cantidad de ternas a utilizar dependiendo de la sección del conductor elegida, realizando la división entre la corriente total que debe circular y la corriente máxima que es capaz de transportar una terna de cables unipolares en forma permanente.

Sección (mm ²)	Cantidad de ternas	Cantidad de ternas (normalizado)
240	4,49	5
300	3,89	4
400	3,30	4

Tabla 2: Cantidad de ternas de cables unipolares a emplear según la sección del conductor

Ahora bien, dado que son varias ternas las que deberán utilizarse sin importar la sección del conductor que se elija, se debe aplicar el factor de corrección debido al agrupamiento de conductores activos. En la Tabla 3 se muestran las corrientes admisibles de las ternas de conductores dependiendo de la cantidad de ternas utilizadas.

El fabricante brinda los factores de corrección para 2, 3, 6 y 9 ternas. Por lo tanto, para obtener un valor aproximado de los factores correspondientes a 4 y 5 ternas se interpola linealmente entre los factores de 3 y 6 ternas. En la Tabla 4 se muestran los factores de corrección calculados y los brindados por el fabricante.

Sección (mm ²)	Cantidad de ternas		
	4	5	6
240	-	1974	2317
300	1864	2280	2677
400	2193	2683	3150

Tabla 3: Corriente admisible, en A, según la sección del conductor y la cantidad de ternas de cables unipolares

Nº de bandejas	Nº de cables por bandeja			
	3	4	5	6
1	0,80	0,78	0,77	0,75

Tabla 4: Factores de corrección para ternas de cables unipolares tendidos en bandejas perforadas en contacto entre sí

Como se puede apreciar en la Tabla 3, con 5 ternas de cables unipolares de 400mm² de Cobre aislados con EPR alcanza para transportar la corriente que circula por el secundario del transformador.

Una vez determinada la sección del cable a utilizar, utilizando la tabla que brinda el fabricante se halla la resistencia del cable de 400mm². La misma resulta ser:

$$R_{cable} = 0,047 \frac{\Omega}{km}$$

En cuanto a la reactancia del cable, el fabricante no da dicho valor. Pero lo que sí brinda el fabricante es un factor para calcular la caída de tensión en el cable. Utilizando dicho factor se puede hallar un valor estimado de la reactancia del cable.

Sabiendo que $\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$ y sabiendo que el fabricante da el factor K de modo que $\Delta U = K \cdot I \cdot d$, siendo d la longitud de la línea en km, queda determinado el factor K según la fórmula (22):

$$K = \sqrt{3} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \text{ con } R \text{ y } X \text{ en } \frac{\Omega}{km} \quad (22)$$

El valor del factor que brinda el fabricante es de K=0,17 para un $\cos \varphi$ de 0,8. Por lo tanto, despejando de la ecuación (22) se obtiene un valor aproximado de la reactancia del cable:

$$X_{cable} = \left(\frac{K}{\sqrt{3}} - R_{cable} \cdot \cos \varphi \right) \cdot \frac{1}{\sin \varphi} \cong 0,101 \frac{\Omega}{km} \quad (23)$$

Los valores obtenidos de resistencia y reactancia corresponden a una terna de cables unipolares. Dado que se van a utilizar 5 ternas, los valores disminuyen. Los mismos se presentan en la Tabla 5.

R_{cable} (Ω/km)	X_{cable} (Ω/km)
0,0094	0,0202

Tabla 5: Resistencia y reactancia de las cinco ternas de cables unipolares

Según la disposición de los diferentes equipos en la subestación de tracción, el largo de la línea que conecta los secundarios del transformador de tres arrollamientos con el rectificador de 12 pulsos es, aproximadamente, de 9,44m.

Sabiendo esta distancia y los valores de la resistencia y de la reactancia de la línea, ahora sí se está en condiciones de hallar el valor de la tensión en el secundario del transformador de 3 bobinados.

Sustituyendo dichos valores en la ecuación (21) se obtienen dos valores de tensión secundaria:

$$\begin{cases} U_{2_1} \cong 19806,0V \\ U_{2_2} \cong 282,2V \end{cases}$$

Aplicando ambas tensiones secundarias se obtiene a la salida del rectificador de 12 pulsos una tensión con valor medio de 750V. Por lo tanto, para determinar cuál es la tensión a emplear, se debe realizar una verificación con la potencia que consume el tranvía.

Conociendo el valor eficaz de la corriente que circula por el secundario del transformador se halla la potencia disponible en cada arrollamiento secundario:

$$\begin{cases} S_1 \cong \sqrt{3} \cdot U_{2_1} \cdot I_{Xeff} \cong 79,36MVA \\ S_2 \cong \sqrt{3} \cdot U_{2_2} \cdot I_{Xeff} \cong 1,13MVA \end{cases}$$

Cada rectificador de 6 pulsos transfiere esa potencia. Resulta claro entonces que la tensión entre fases del secundario del transformador debe ser 282,2V, pues la potencia que consume el tranvía es de 2,2MW.

Determinación de las relaciones de transformación

Una vez determinada la tensión eficaz entre fases de los secundarios del transformador de tres arrollamientos, se pueden hallar las relaciones de transformación del mismo.

Sustituyendo el valor de la tensión eficaz secundaria en las ecuaciones (3) y (4), y sabiendo que la tensión eficaz primaria es $U_1=31.500V$, quedan determinadas las relaciones de vueltas de los arrollamientos:

$$\frac{N_1}{N} = \frac{U_2}{U_1} \cong \frac{282,2}{31500} \quad (24)$$

$$\frac{N_2}{N} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} \cong \sqrt{3} \cdot \frac{282,2}{31500} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N} \quad (25)$$

Determinación del valor eficaz de la corriente primaria

Conociendo la relación $\frac{U_2}{U_1}$, se sustituye la misma en la ecuación (19) antes determinada y de esta manera se obtiene el valor eficaz de la corriente que circula por el primario del transformador:

$$I_{Reff} \cong \frac{2 \cdot U_2}{U_1} \cdot 2313,3A \rightarrow I_{Reff} \cong 41,4A \quad (26)$$

Conociendo el valor de dicha corriente, y sabiendo que, según la disposición adoptada para los diferentes equipos dentro de la subestación de tracción, la distancia entre la celda de media tensión de salida hacia el transformador de tres arrollamientos y el primario del transformador es, aproximadamente, de 18,3m, se puede determinar el cable de media tensión de interconexión entre la celda y el transformador.

Determinación del cable de conexión entre el arrollamiento primario del transformador y la celda de media tensión

Sabiendo que $I_{Ref} \cong 41,4A$, se puede determinar la sección del cable a utilizar por medio del criterio de corriente admisible.

Del catálogo de cables de media tensión empleado se obtienen los valores de corriente admisible según la sección del conductor, los cuales se presentan en la Tabla 6. Dado que los cables de media tensión van a ir dentro de un canal, se tomaron los valores de corriente admisible suponiendo tres cables unipolares agrupados, enterrados 1m. Los cables de media tensión que se utilizarán son de aluminio, aislados con polietileno reticulado (XLPE).

Sección (mm ²)	Corriente Admisible (A)
16	95
25	120
35	145
50	170

Tabla 6: Corriente admisible del conductor según la sección del mismo

Dado que la corriente que circulará por el conductor no es elevada, alcanza con utilizar una terna de cables unipolares. Según la Tabla 6, alcanzaría con una terna de cables unipolares de 16mm². Una vez determinada la sección del conductor a utilizar, se debe realizar la verificación de la corriente de cortocircuito.

El conductor debe ser capaz de absorber el exceso de energía producido durante un cortocircuito sin dañarse. Para ello, se debe cumplir con la siguiente relación:

$$I_{ccmax}^2 \cdot t_{ap} \leq (K \cdot S)^2 \quad (27)$$

En donde I_{ccmax} corresponde a la máxima corriente de cortocircuito (en A) que el conductor debe ser capaz de soportar, t_{ap} es el tiempo de apertura (en s) de la protección aguas arriba del conductor, S es la sección del mismo (en mm²) y K es una constante

que depende del material del conductor y del tipo de aislamiento del mismo. En este caso, $K=93$ ya que se trata de un conductor de aluminio aislado con XLPE.

En la Tabla 7 se presentan las máximas corrientes de cortocircuito en las celdas de media tensión de las subestaciones de tracción:

	Máxima corriente de cortocircuito (A)
SSEE 1 y 2	11415
SSEE 3 y 4	13673
SSEE 5	9061

Tabla 7: Máximas corrientes de cortocircuito en las celdas de MT de las subestaciones de tracción

La expresión (27) impone una sección mínima del conductor, de modo que el mismo pueda absorber el exceso de energía producido durante el cortocircuito. Para cada subestación de tracción, queda determinado entonces un valor mínimo de sección. Los mismos se pueden apreciar en la Tabla 8.

	S_{\min} (mm²)
SSEE 1 y 2	26
SSEE 3 y 4	31
SSEE 5	21

Tabla 8: Secciones mínimas del conductor de conexión entre la celda de MT y el arrollamiento primario del transformador de 3 bobinados

De este modo, para las subestaciones de tracción 1, 2, 3 y 4, el conductor tendrá una sección de 35mm^2 , mientras que para la subestación 5 el mismo será de 25mm^2 .

Ahora bien, dado que dicha terna de cables va dentro de un canal agrupada con otras ternas de cables, se debe aplicar el factor de corrección debido al agrupamiento de conductores activos. Dado que no se dispone de los factores de corrección para cables tendidos en canales, se suponen los valores para cables enterrados en zanjas a 1m de profundidad, en contacto entre sí.

Son 3 las ternas que se encuentran en contacto entre sí dentro del canal: una correspondiente a la llegada desde el Puesto de Conexión y Medida de UTE, otra correspondiente a la salida hacia el bobinado primario del transformador de tres arrollamientos, y la otra correspondiente a la llegada a la celda desde el inversor.

El fabricante brinda los factores de corrección para varias ternas, entre ellas para 3 ternas. En la Tabla 9 se muestra el factor de corrección brindado por el fabricante.

	Nº de cables en la zanja
	3
En contacto	0,70

Tabla 9: Factor de corrección para tres ternas de cables unipolares tendidos en una zanja, en contacto entre sí

Utilizando el factor de corrección que se presenta en la Tabla 9, la corriente máxima admisible por el cable de 35mm² es de 101,5A, mientras que la corriente máxima admisible por el cable de 25mm² es de 84A. Por lo tanto, alcanza con una terna de cables unipolares de 35mm² (subestaciones 1, 2, 3 y 4) o de 25mm² (subestación 5) de aluminio aislados en XLPE para transportar la corriente que circula por el primario del transformador.

Una vez determinada la sección del cable a utilizar, utilizando la tabla que brinda el fabricante se halla la resistencia del conductor. Las mismas resultan ser:

$$R_{cable_35mm^2} = 1,093 \frac{\Omega}{km}$$

$$R_{cable_25mm^2} = 1,513 \frac{\Omega}{km}$$

En cuanto a la reactancia del cable, el fabricante brinda una tabla con valores de reactancia para las diferentes secciones de cables y tensiones nominales de uso. Dichos valores se presentan en la Figura 3.

Sección nominal mm ²	Reactancia X en Ω/Km. por fase Tensión nominal del cable							
	1,8/3 kV	3,6/6 kV	6/10 kV	8,7/15 kV	12/20 kV	15/25 kV	18/30 kV	26/45 kV
Tres cables unipolares en contacto mutuo								
10	0,136	0,141	-	-	-	-	-	-
16	0,126	0,130	0,143	-	-	-	-	-
25	0,117	0,121	0,134	0,141	-	-	-	-
35	0,111	0,115	0,128	0,135	0,140	-	-	-
50	0,106	0,109	0,122	0,128	0,133	0,139	0,144	-
70	0,100	0,103	0,115	0,120	0,125	0,131	0,136	0,140
95	0,095	0,098	0,110	0,115	0,120	0,126	0,130	0,133
120	0,092	0,095	0,106	0,111	0,115	0,121	0,125	0,128
150	0,090	0,092	0,102	0,108	0,112	0,117	0,121	0,124
185	0,088	0,091	0,100	0,104	0,108	0,113	0,117	0,120
240	0,085	0,088	0,097	0,101	0,105	0,109	0,113	0,115
300	0,083	0,087	0,093	0,097	0,101	0,105	0,109	0,112
400	0,081	0,085	0,091	0,095	0,098	0,102	0,106	0,108
500	0,080	0,084	0,089	0,092	0,095	0,099	0,102	0,104

Figura 3: Valores de la reactancia por fase para diferentes secciones del cable y tensiones nominales

Resulta que el valor de la reactancia para 30kV no aparece en la misma.

Por lo tanto, para hallar un valor aproximado de la reactancia del cable se realizó el siguiente procedimiento: se tomó el valor de la reactancia para 30kV (Columna 7), para secciones de cable entre 50mm² y 500mm², dividiendo dicho valor entre la reactancia para 3kV (Columna 1). El mayor valor que se obtiene es 1,36. Este valor lo multiplico por el valor de la reactancia para 3kV para las secciones de 25mm² y de 35mm², obteniendo de esta manera un valor estimado de la reactancia para 30kV.

Los valores de reactancia que se obtienen son:

$$\begin{cases} X_{cable_35mm^2} = 1,36 \cdot 0,111 \cong 0,151 \frac{\Omega}{km} \\ X_{cable_25mm^2} = 1,36 \cdot 0,117 \cong 0,159 \frac{\Omega}{km} \end{cases} \quad (28)$$

Los valores obtenidos de resistencia y reactancia corresponden a una terna de cables unipolares. Los mismos se presentan en la Tabla 10.

Sección del conductor	R_{cable} (Ω/km)	X_{cable} (Ω/km)
25mm ²	1,513	0,159
35mm ²	1,093	0,151

Tabla 10: Resistencia y reactancia de la terna de cables unipolares de media tensión

Para calcular la caída de tensión que hay en el cable, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot d \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \quad (29)$$

Siendo d la distancia en km de la línea, I la corriente en A que circula por la misma, R y X la resistencia y reactancia en Ω/km de la línea respectivamente.

Según la disposición de los diferentes equipos en la subestación de tracción, el largo de la línea que conecta la celda de media tensión con el primario del transformador de tres bobinados es de 18,3m.

Teniendo en cuenta que la carga conectada al transformador de 3 arrollamientos puede considerarse resistiva pura (lo cual implica un desfase entre tensión y corriente $\varphi=0$), la caída de tensión que presenta la línea es de $\Delta U \cong 1,4V$ para las subestaciones dobles y $\Delta U \cong 2,0V$ para la subestación simple, lo que equivale a un 0,005% y 0,006% de la tensión nominal de trabajo respectivamente.

Especificaciones técnicas del transformador de tres arrollamientos

Según las operaciones efectuadas y los valores a los que se arribaron, las especificaciones técnicas del transformador de tres arrollamientos son las siguientes:

Tensión Nominal Primaria: 31500V

Tensión Nominal Secundaria: 282V

Tensión Nominal Terciaria: 282V

Potencia Nominal Bobinado Primario: 2,5MVA

Potencia Nominal Bobinado Secundario: 1,5MVA

Potencia Nominal Bobinado Terciario: 1,5MVA

Frecuencia Nominal: 50Hz

Regulación Primaria: $\pm 2 \times 2,5\%$

Grupo de Conexión: Yy0d11

Tensión de Cortocircuito: $u_{cc_RS}=4\%$

$u_{cc_ST}=4\%$

$u_{cc_TR}=4\%$

Diferencia entre Tensiones de Cortocircuito de los Secundarios: $\Delta u_{cc} \leq 5\%$

Diferencia de Tensiones de Vacío de los Secundarios: $\Delta U \leq 0,5\%$

Anexo B: Iluminación de las Subestaciones de Tracción

1. Introducción

Las instalaciones de energía eléctrica, como son las subestaciones, deben ser dotadas de alumbrado para que el personal de operación, mantenimiento y vigilancia puedan desarrollar sus trabajos respectivos. Aún en subestaciones automatizadas, en que prácticamente no hay personal, se requiere alumbrado.

En la iluminación de una subestación se pueden considerar cuatro propósitos básicos:

1. Seguridad en la operación de los equipos
2. Circulación sin peligro
3. Inspección de los equipos
4. Trabajos de mantenimiento

Una cuestión importante en las subestaciones es el llamado alumbrado de emergencia. Al fallar el servicio, todas las áreas quedarían sin luz, precisamente en momentos en que es necesaria la realización de maniobras. Para evitarlo, se debe contar con un alumbrado de emergencia, alimentado por un circuito de batería. El circuito de entrada a las lámparas de emergencia está provisto de un relevador que, al fallar la alimentación de alterna, cierra automáticamente la alimentación de continua, regresando al circuito de alterna tan pronto se restablece el servicio normal. Este tipo de alumbrado se debe instalar en escaleras, pasillos de acceso y en áreas donde el personal pueda llegar a tener contacto accidental con partes energizadas.

Los reglamentos disponen que la iluminación de subestaciones debe estar comprendida entre 30 y 70 luxes, aumentándose en la sala de tableros hasta valores de 150 luxes. [50]

2. Software utilizado

Para determinar la configuración de las luminarias de forma que se aseguren estos niveles de iluminación se utiliza el software de iluminación de distribución gratuita DIALUX[®]. El mismo permite, entre muchas otras prestaciones, dada una configuración de luminarias calcular el nivel medio de iluminación en una zona de trabajo específica. Además, se pueden agregar objetos interiores (prismas, cubos, cilindros, etc). Es así que mediante la introducción de cubos de diferentes dimensiones se modelaron: las celdas de Media Tensión, los inversores, los rectificadores, los transformadores, los disyuntores DC, los tableros, las canalizaciones y las bandejas.

3. Luminarias utilizadas

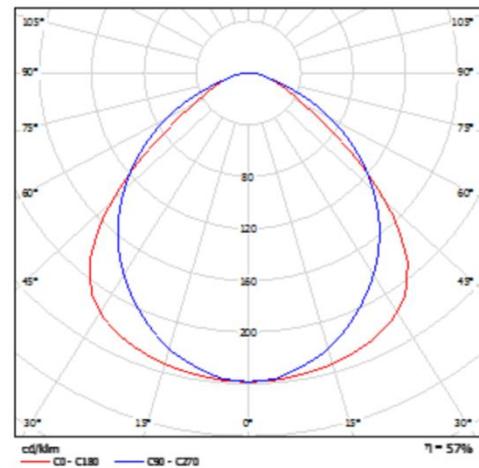
3.1. Alumbrado normal

Para la iluminación normal de las subestaciones de tracción, se utilizaron las siguientes luminarias:

3F Filippi 1284 3Fine 2x36 3DEC / Hoja de datos de luminarias



Emisión de luz 1:



Clasificación luminarias según CIE: 100
Código CIE Flux: 56 88 98 100 57

CARACTERÍSTICAS LUMINOTÉCNICAS
Rendimiento luminoso >57%.
Distribución directa simétrica.
UGR <19 (EN 12464-1).

MECÁNICAS
Óptica parabólica 3DEC decorativa de celda cuadrada de aluminio pintado de blanco, con aletas transversales cerradas en la parte superior.
Película protectora contra polvo y huellas, adhesiva, aplicada en la óptica.
Cuerpo y cabezales monobloque de acero estampado, pintado de blanco.
Dimensiones: 322x1257 mm, altura 88 mm. Peso 8,26 kg.
Grado de protección IP20.
Instalación también sobre superficies normalmente inflamables. - F -
Resistencia al hilo incandescente 960°C.

ELÉCTRICAS
Cableado con equipo de bajas pérdidas EEI B2, 230V-50Hz, con corrección de factor de potencia, fusible, clase I.
ENEC.

APLICACIONES
Ambientes comerciales, arquitectónicos, de espera y de paso.

Emisión de luz 1:

Valoración de deslumbramiento según UGR												
		70	70	80	80	90	90	70	70	80	80	90
a. Tensión		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
b. Distancia		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
c. Sujeto		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tamaño del local	X	Y	Mirado en posición lateral al eje de lámpara				Mirado longitudinalmente al eje de lámpara					
2H	2H	16,2	17,4	18,5	17,8	17,5	17,2	18,4	17,5	18,8	18,8	18,8
	3H	16,7	17,8	17,0	18,0	18,3	18,0	19,1	18,3	19,3	19,8	19,8
	4H	16,9	17,9	17,3	18,2	18,5	18,2	19,2	18,5	19,5	19,7	19,7
	5H	17,1	18,0	17,8	18,3	18,8	18,3	19,2	18,8	19,8	19,8	19,8
4H	2H	17,2	18,1	17,8	18,4	18,7	18,3	19,2	18,7	19,5	19,5	19,5
	3H	17,3	18,1	17,8	18,4	18,7	18,4	19,2	18,7	19,5	19,5	19,5
	4H	17,5	18,5	17,8	18,5	19,2	18,7	19,5	19,5	19,7	19,7	19,7
	5H	17,8	18,5	18,3	18,9	19,3	18,9	19,8	19,3	19,9	20,3	20,3
8H	2H	17,9	18,5	18,3	18,9	19,3	18,9	19,8	19,3	19,9	20,4	20,4
	3H	18,0	18,8	18,5	19,0	19,4	19,0	19,8	19,4	19,9	20,4	20,4
	4H	18,1	18,8	18,6	19,1	19,5	19,1	19,8	19,5	20,0	20,4	20,4
	5H	18,2	18,8	18,6	19,1	19,5	19,1	19,8	19,5	20,0	20,4	20,4
1,2H	2H	17,7	18,3	18,2	18,7	19,1	18,7	19,5	19,2	19,7	20,1	20,1
	3H	18,1	18,8	18,6	19,1	19,5	19,1	19,8	19,5	19,9	20,4	20,4
	4H	18,2	18,8	18,6	19,1	19,5	19,1	19,8	19,5	19,9	20,4	20,4
	5H	18,4	18,7	18,6	19,2	19,7	19,2	19,8	19,7	20,0	20,5	20,5
Variación de la posición del espectador para aplicaciones E entre luminarias												
S = 1,0H		+0,4	-0,5		+0,2	-0,3		+0,2	-0,3		+0,2	-0,3
S = 1,5H		+0,5	-1,0		+0,7	-0,9		+0,7	-0,9		+0,7	-0,9
S = 2,0H		+1,7	-2,1		+0,9	-1,5		+0,9	-1,5		+0,9	-1,5
Tabla estándar		S103				S103						
Sumando de corrección		-1,5				-0,5						
Índice de deslumbramiento corregido en relación a E1000 (Ujo) (ver hoja 3da)												

Figura 1: Catálogo de las luminarias para iluminación normal utilizadas

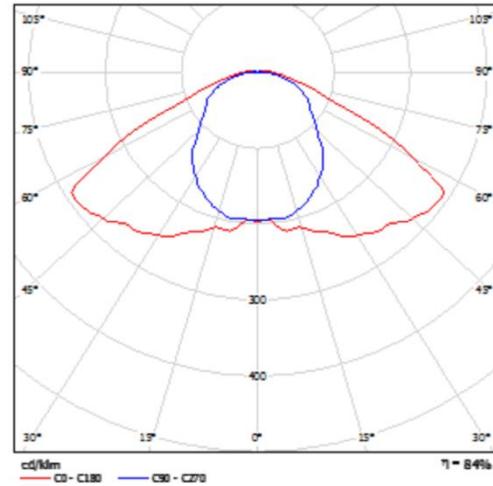
3.2. Alumbrado de emergencia

Para la iluminación de emergencia de las subestaciones de tracción, se utilizaron las siguientes luminarias:

Schneider Electric OVA37223E DOMINA 640lm 1h NM IP65 / Hoja de datos de luminarias



Emisión de luz 1:



Clasificación luminarias según CIE: 97
Código CIE Flux: 39 75 94 98 84

Emisión de luz 1:

Valoración de deslumbramiento según UGR											
α (°)	70	70	80	80	90	90	70	70	80	80	
β (°)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
γ (°)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Tamaño del local	Nivel de ocupación					Nivel de longitud de onda					
X	de 0 a 100%					de 400 a 700 nm					
2H	2H	18.8	19.9	18.8	20.2	20.5	14.4	15.9	14.5	16.1	16.4
	3H	19.8	20.8	19.9	21.1	21.4	15.7	17.0	16.1	17.5	17.8
	4H	19.8	21.0	20.2	21.3	21.7	16.2	17.4	16.8	17.8	18.1
	5H	20.0	21.1	20.4	21.5	21.9	16.7	17.8	17.1	18.2	18.5
	6H	20.1	21.2	20.5	21.6	22.0	16.9	18.0	17.3	18.3	18.7
4H	1.2H	20.2	21.2	20.6	21.6	22.0	17.1	18.1	17.5	18.5	18.9
	2H	18.8	19.9	19.1	20.3	20.6	15.7	16.9	16.1	17.5	17.8
	3H	19.9	20.9	20.3	21.3	21.7	17.0	18.0	17.4	18.4	18.8
	4H	20.3	21.2	20.6	21.6	22.1	17.6	18.5	18.1	19.0	19.3
	5H	20.7	21.5	21.1	21.9	22.3	18.2	19.0	18.6	19.4	19.8
5H	1.2H	21.0	21.6	21.5	22.0	22.5	18.4	19.1	18.9	19.6	20.1
	2H	20.4	21.1	20.9	21.6	22.1	17.9	18.7	18.4	19.1	19.6
	3H	20.9	21.5	21.4	21.9	22.4	18.6	19.2	19.1	19.7	20.2
	4H	21.1	21.6	21.6	22.1	22.6	19.0	19.5	19.5	20.0	20.5
	1.2H	21.3	21.8	21.9	22.3	22.9	19.3	19.8	19.8	20.3	20.8
1.2H	4H	20.4	21.1	20.9	21.6	22.0	18.0	18.6	18.5	19.1	19.6
	5H	20.9	21.4	21.4	21.9	22.4	18.7	19.3	19.3	19.8	20.3
	6H	21.1	21.6	21.7	22.1	22.7	19.1	19.6	19.7	20.1	20.7
Variación de la posición del espectador para separaciones E entre luminarias											
E = 1.0H	+0.1 / -0.1					+0.2 / -0.2					
E = 1.5H	+0.5 / -0.5					+0.5 / -0.5					
E = 2.0H	+1.5 / -1.4					+1.0 / -1.1					
Tamaño estándar	5004					5004					
Sumando de composición	3.2					1.5					
Índice de deslumbramiento corrigido en relación a 640 m flujo luminoso total											

Figura 2: Catálogo de las luminarias para iluminación de emergencia utilizadas

A continuación se presentan los resultados luminotécnicos de los locales interiores, tanto para el alumbrado normal como para el alumbrado de emergencia.

4. Iluminación de la Subestación Simple

4.1. Alumbrado normal

En la Figura 3 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX® sobre la determinación de la cantidad de luminarias necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 4 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 5 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción simple.

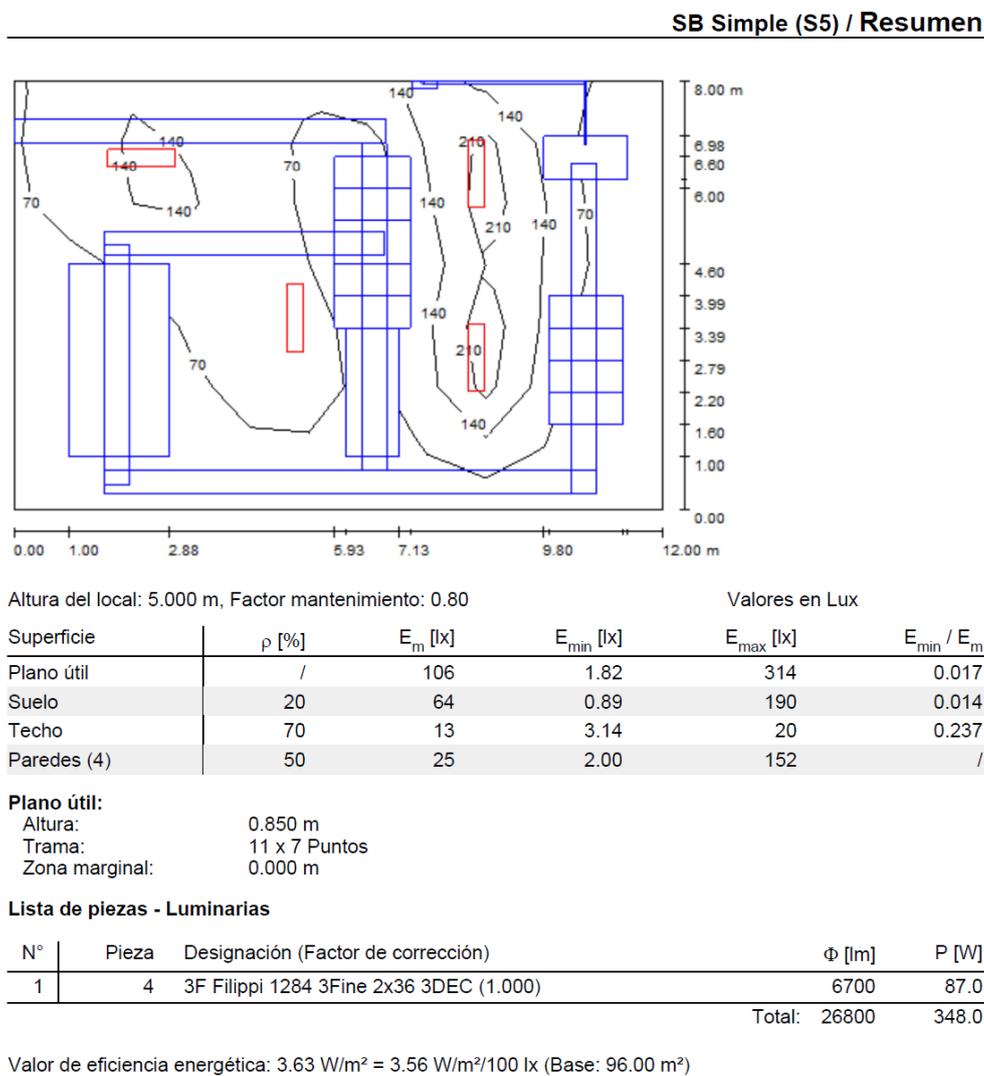
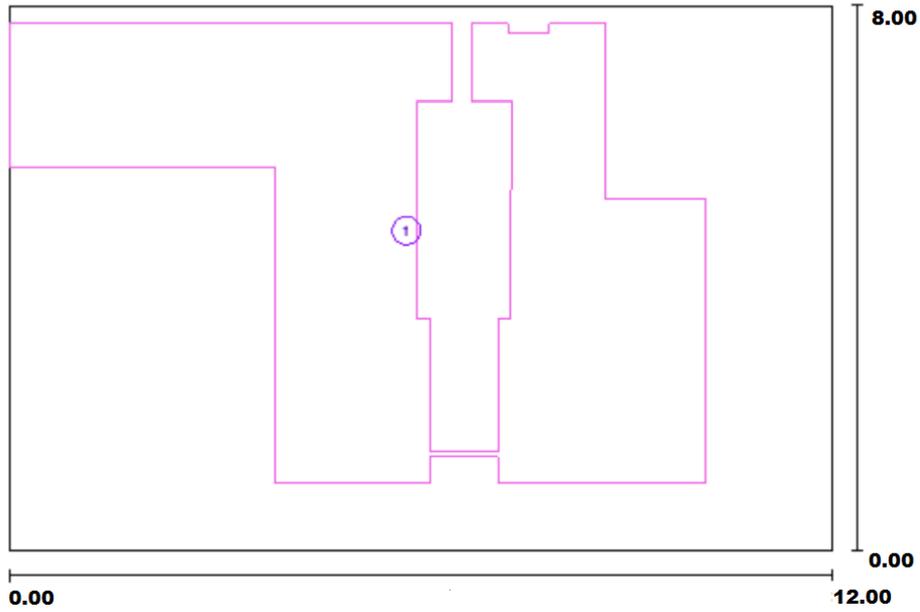


Figura 3: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Simple (S5) / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

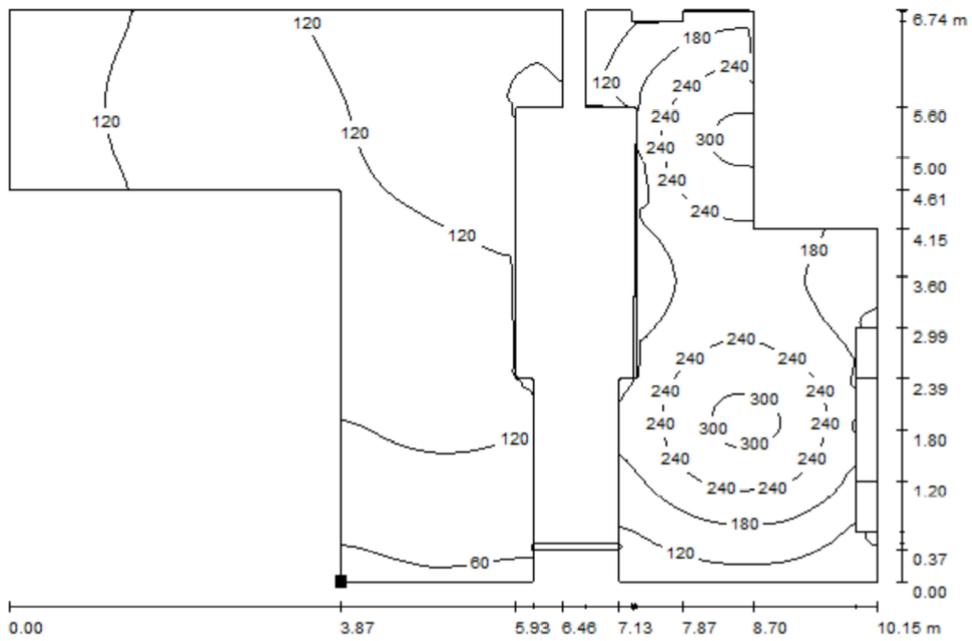


Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	150	22	313	0.143	0.069

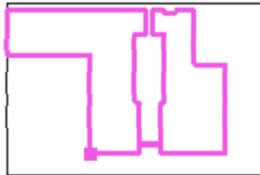
Figura 4: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Simple (S5) / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:



Trama: 128 x 128 Puntos

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
150	22	313	0.143	0.069

Figura 5: Isolíneas – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

En la Figura 6 se presenta una imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción simple con las luminarias y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 7 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción simple con las luminarias y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.

SB Simple (S5) / Rendering (procesado) en 3D

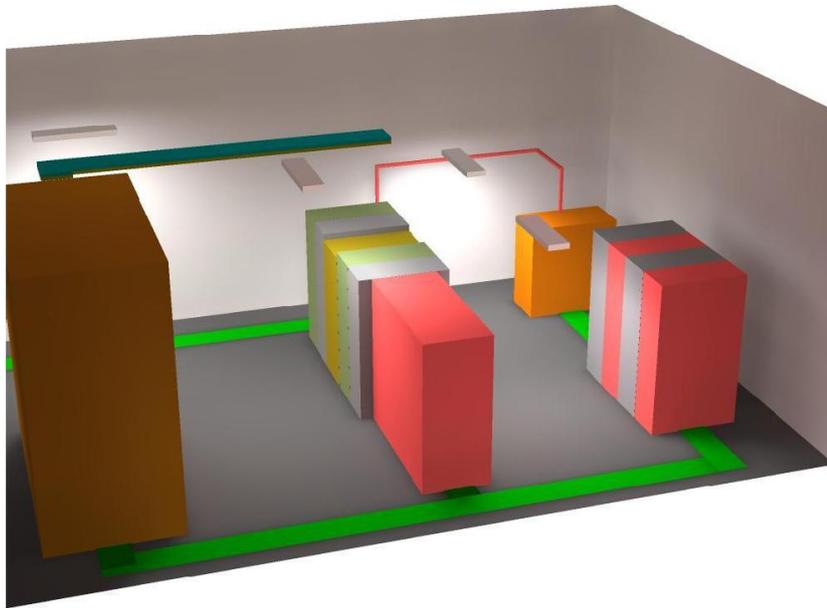


Figura 6: Imagen tridimensional – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

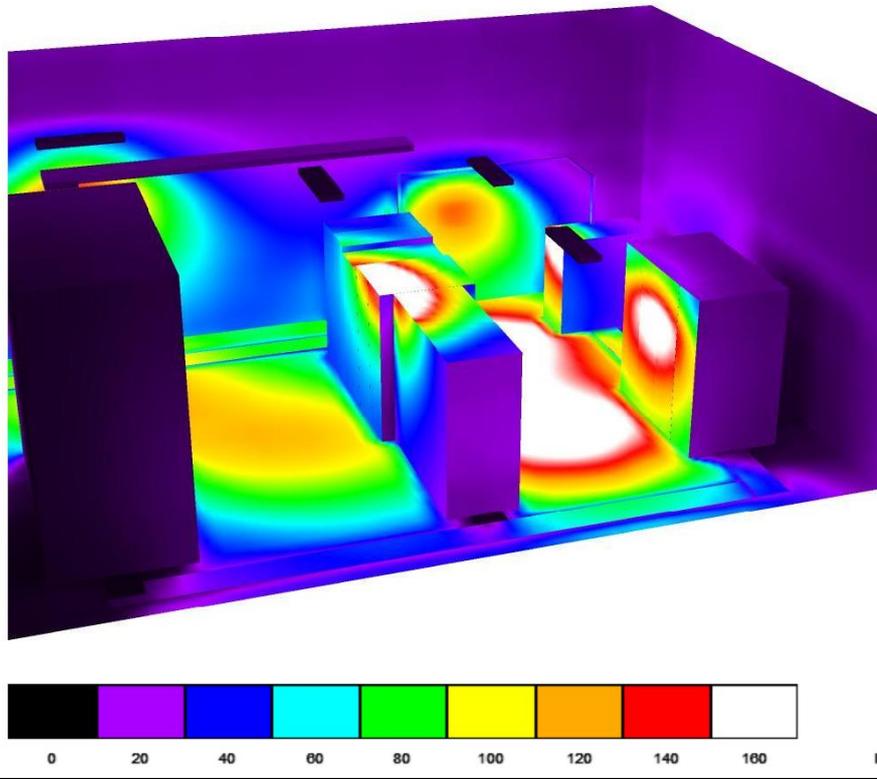


Figura 7: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

4.2. Alumbrado de emergencia

En la Figura 8 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX® sobre la determinación de la cantidad de luminarias necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 9 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 10 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción simple.

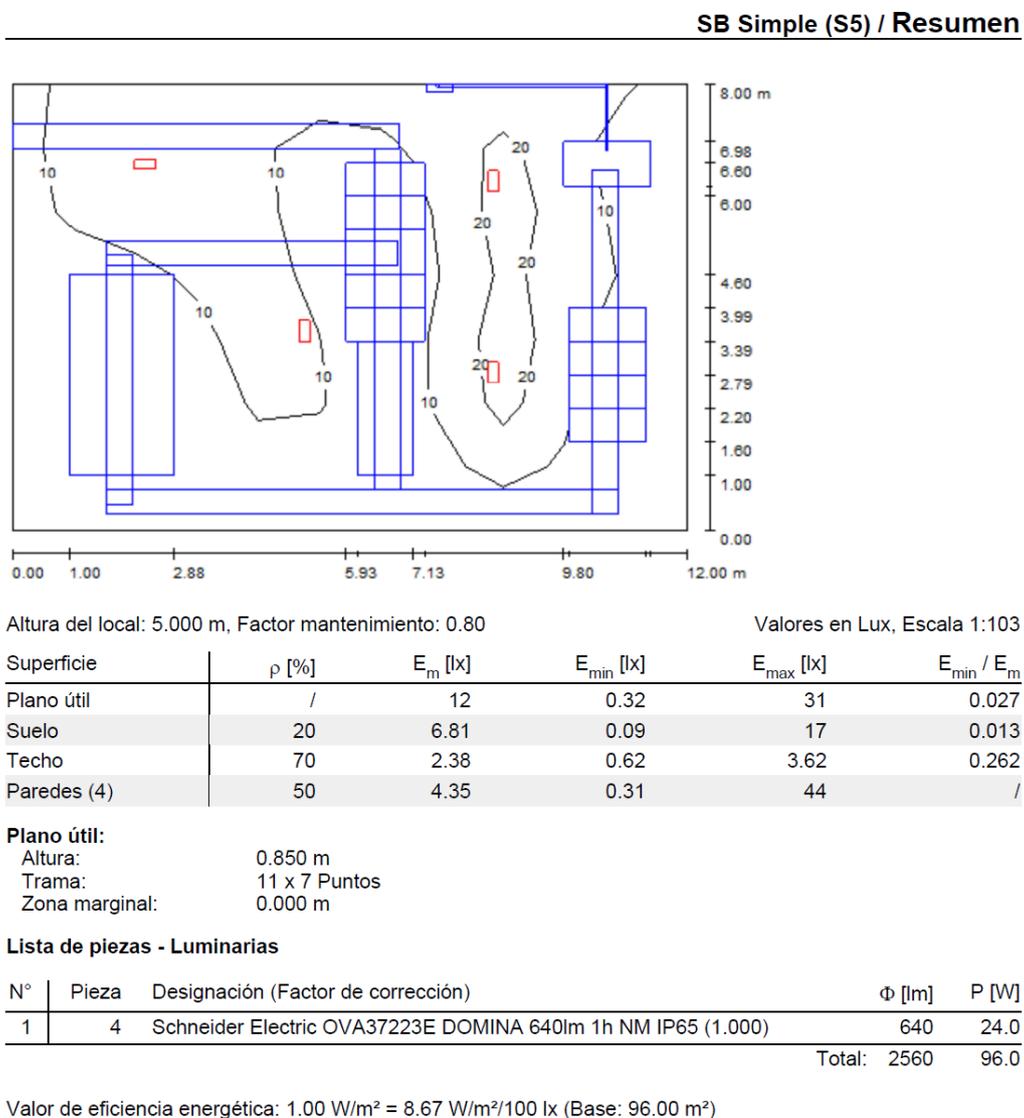
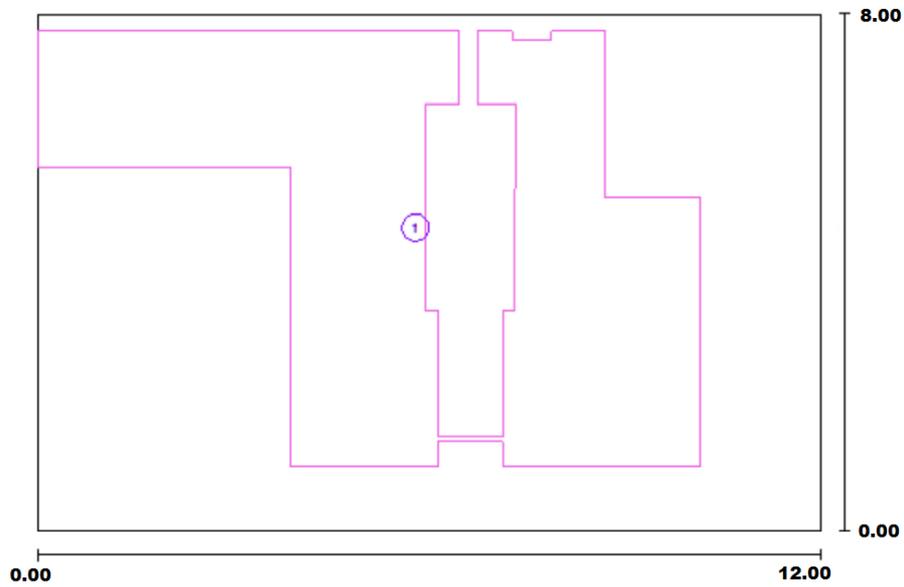


Figura 8: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Simple (S5) / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

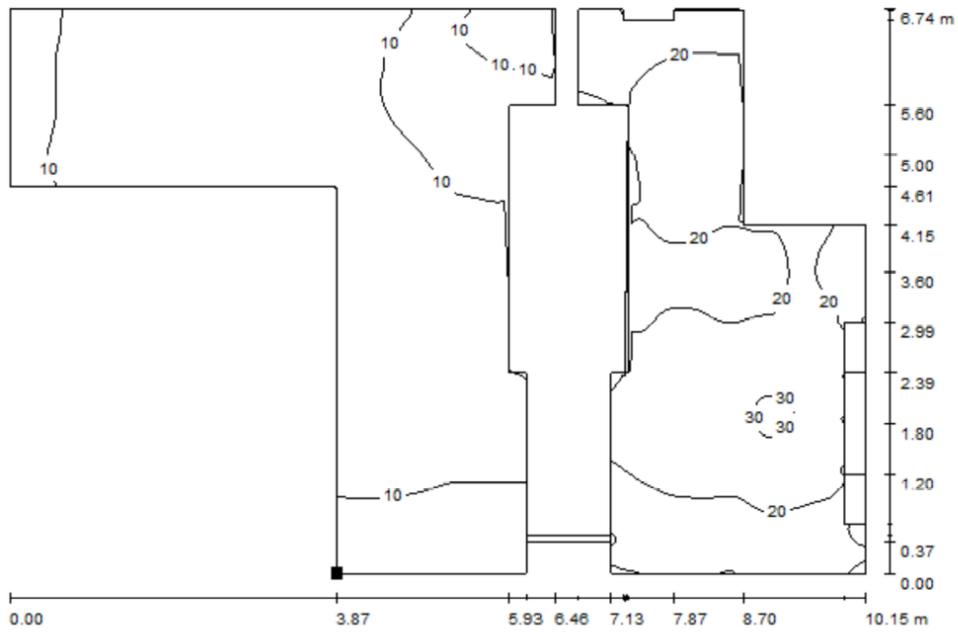


Lista de superficies de cálculo

N°	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	16	1.94	32	0.123	0.061

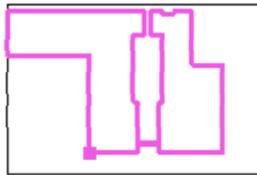
Figura 9: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Simple (S5) / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:
 Punto marcado:
 (27.881 m, 18.325 m, 0.850 m)



Trama: 128 x 128 Puntos

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
16	1.94	32	0.123	0.061

Figura 10: Isolíneas – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

En la Figura 11 se presenta una imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción simple con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 12 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción simple con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.

SB Simple (S5) / Rendering (procesado) en 3D

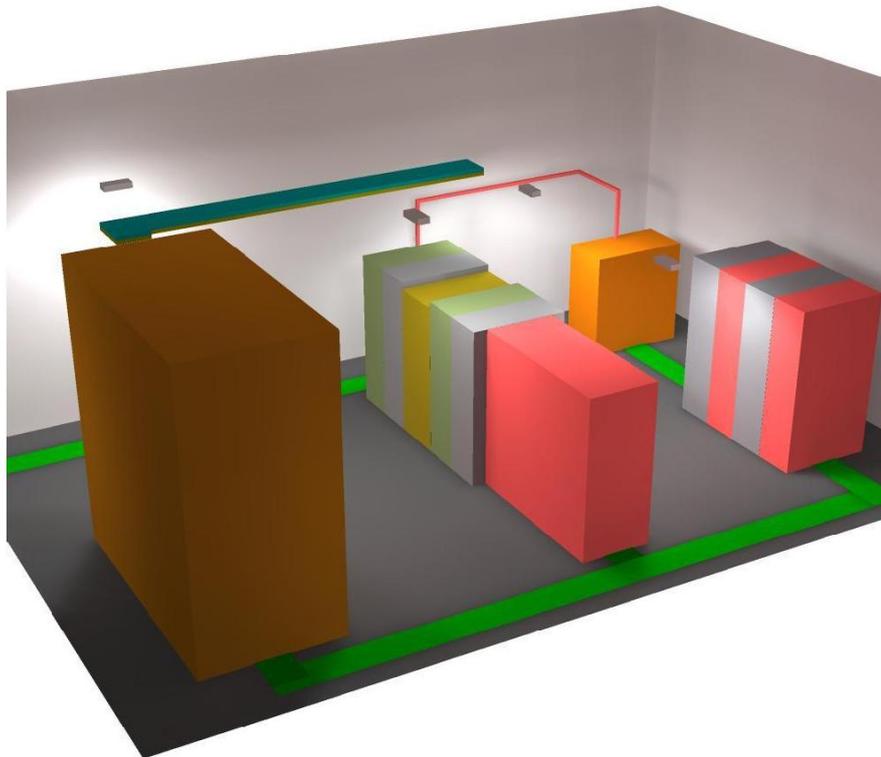


Figura 11: Imagen tridimensional – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

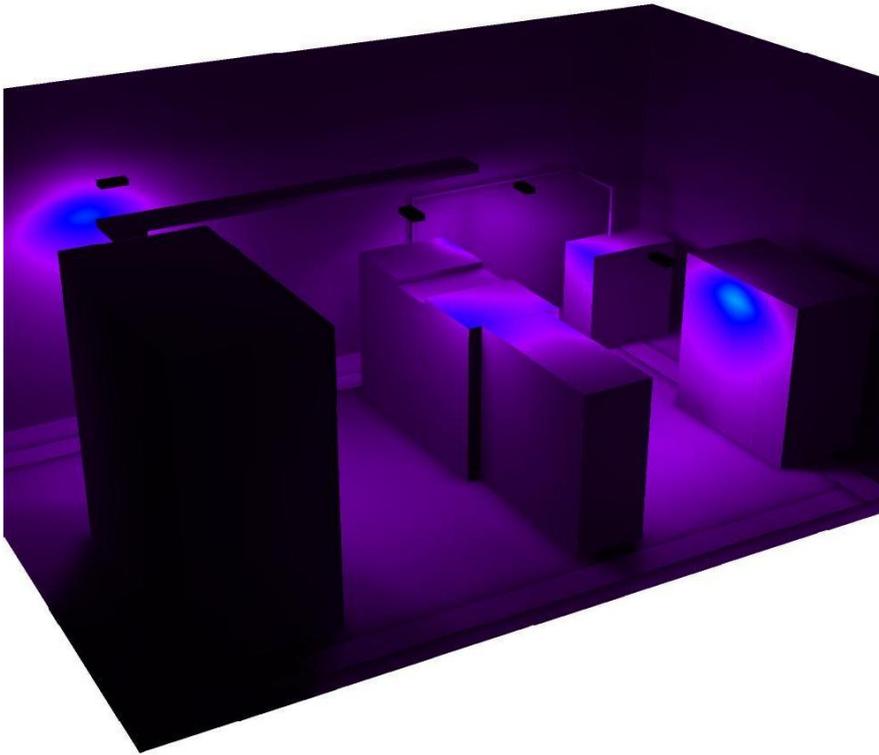


Figura 12: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Simple (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

5. Iluminación de la Subestación Doble (Local A)

5.1. Alumbrado normal

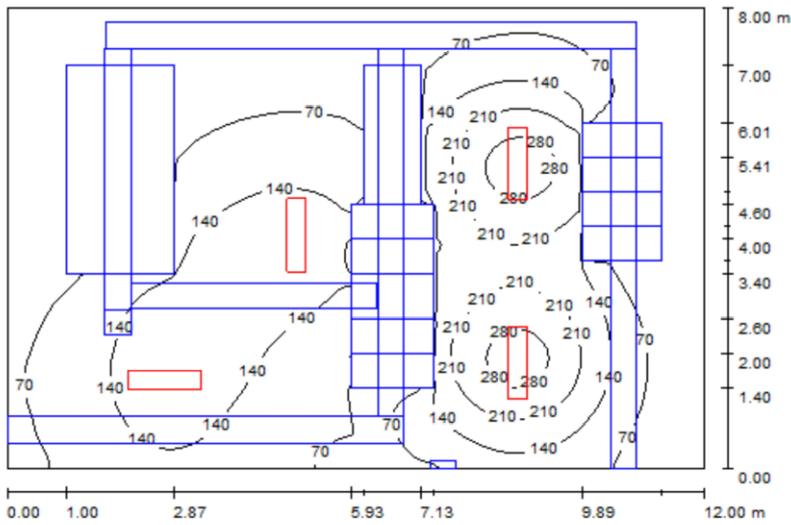
En la Figura 13 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX® sobre la determinación de la cantidad de luminarias necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 14 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 15 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción.

En la Figura 16 se presenta la imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias normales y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 17 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias normales y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.



Altura del local: 5.000 m, Factor mantenimiento: 0.80

Valores en Lux

Superficie	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Plano útil	/	109	1.62	314	0.015
Suelo	20	67	0.89	190	0.013
Techo	70	13	2.88	20	0.220
Paredes (4)	50	25	1.76	137	/

Plano útil:

Altura: 0.850 m
 Trama: 128 x 128 Puntos
 Zona marginal: 0.000 m

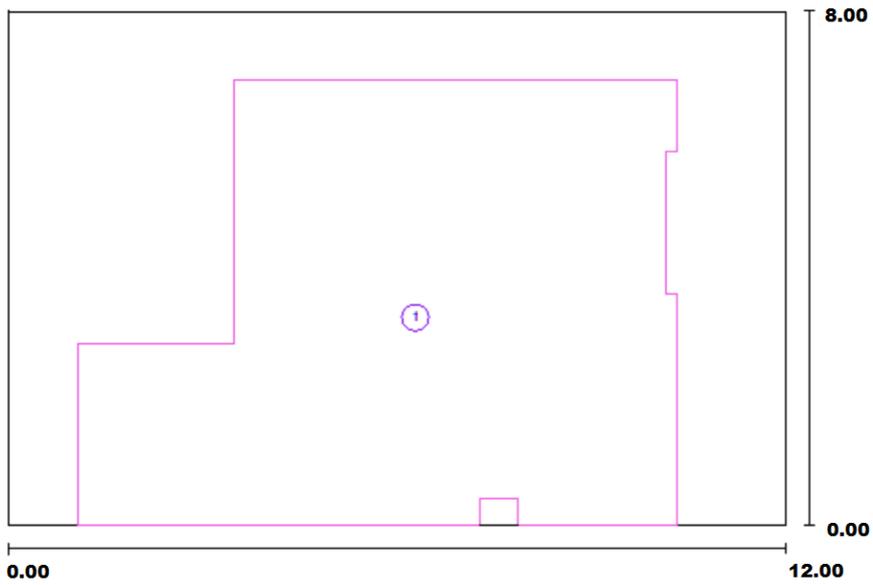
Lista de piezas - Luminarias

Nº	Pieza	Designación (Factor de corrección)	Φ [lm]	P [W]
1	4	3F Filippi 1284 3Fine 2x36 3DEC (1.000)	6700	87.0
Total:			26800	348.0

Valor de eficiencia energética: $3.63 \text{ W/m}^2 = 3.32 \text{ W/m}^2 / 100 \text{ lx}$ (Base: 96.00 m^2)

Figura 13: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble A / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

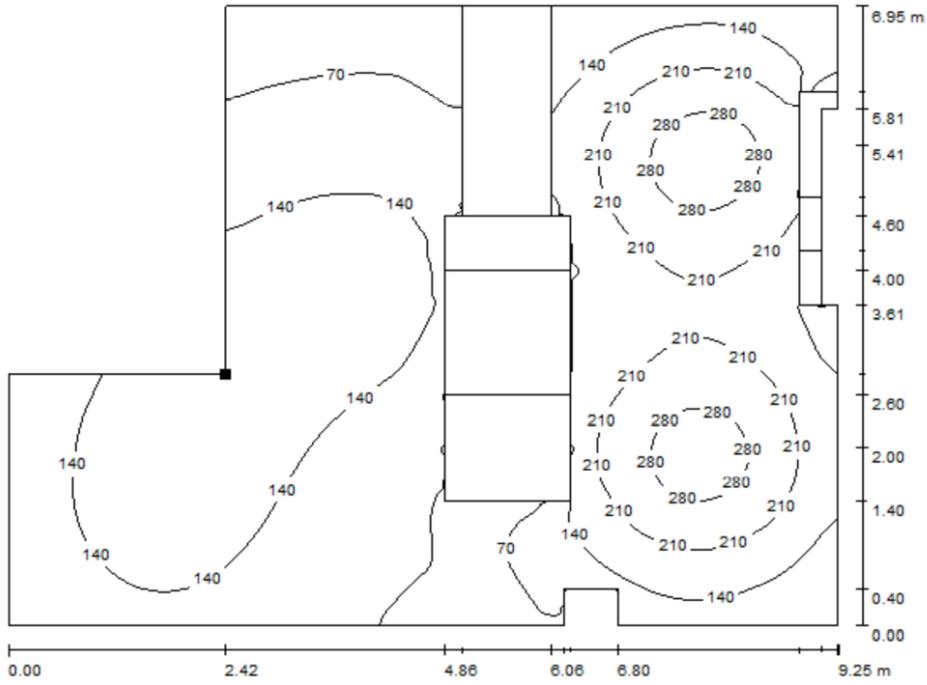


Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	154	15	316	0.099	0.048

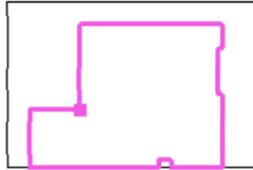
Figura 14: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble A / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:



Trama: 128 x 128 Puntos

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
154	15	316	0.099	0.048

Figura 15: Isolíneas – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

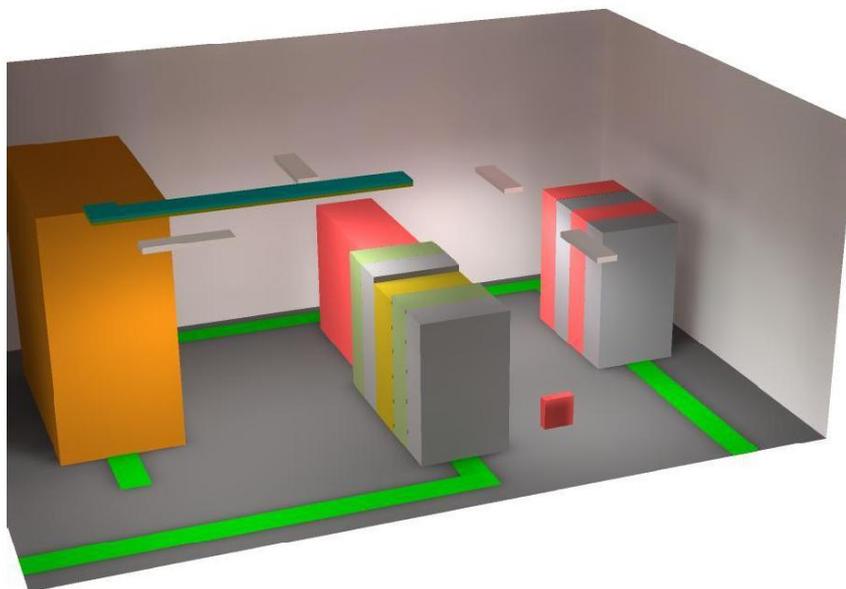


Figura 16: Imagen tridimensional – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

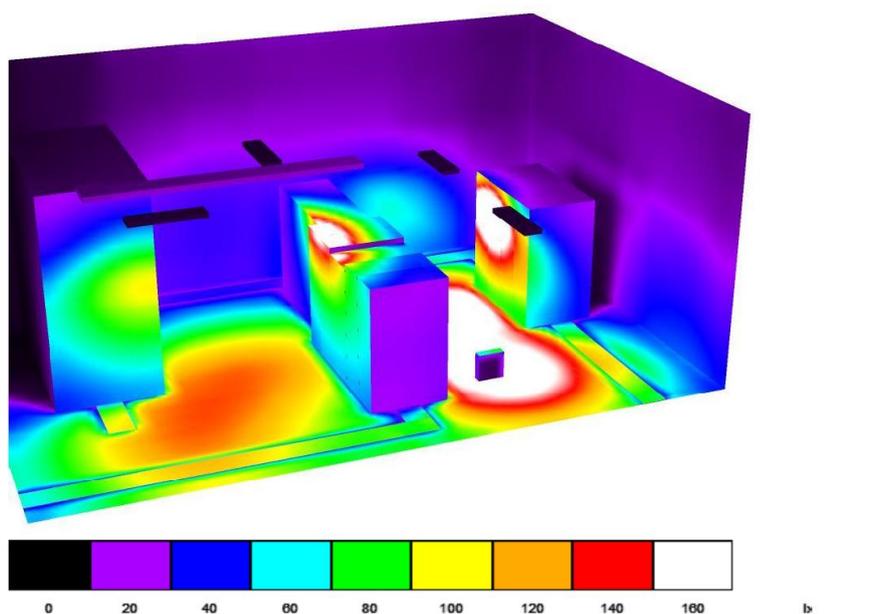


Figura 17: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

5.2. Alumbrado de emergencia

En la Figura 18 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX[®] sobre la determinación de la cantidad de luminarias de emergencia necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 19 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 20 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción.

En la Figura 21 se presenta la imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 22 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.

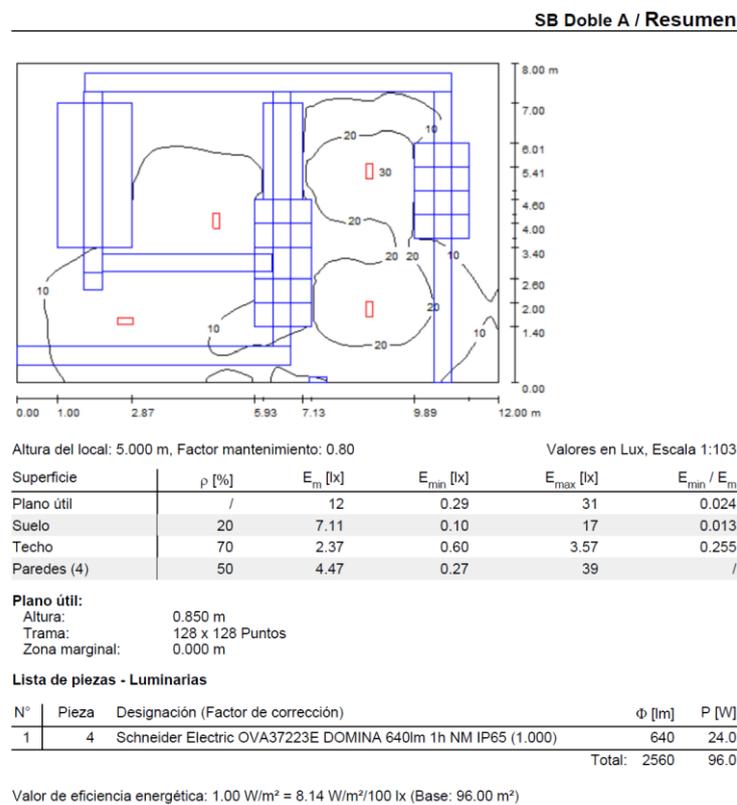
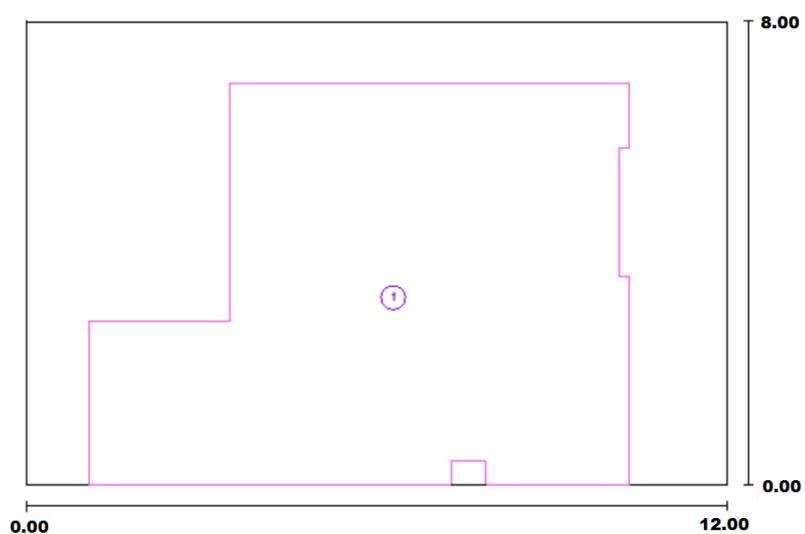


Figura 18: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX[®])

SB Doble A / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

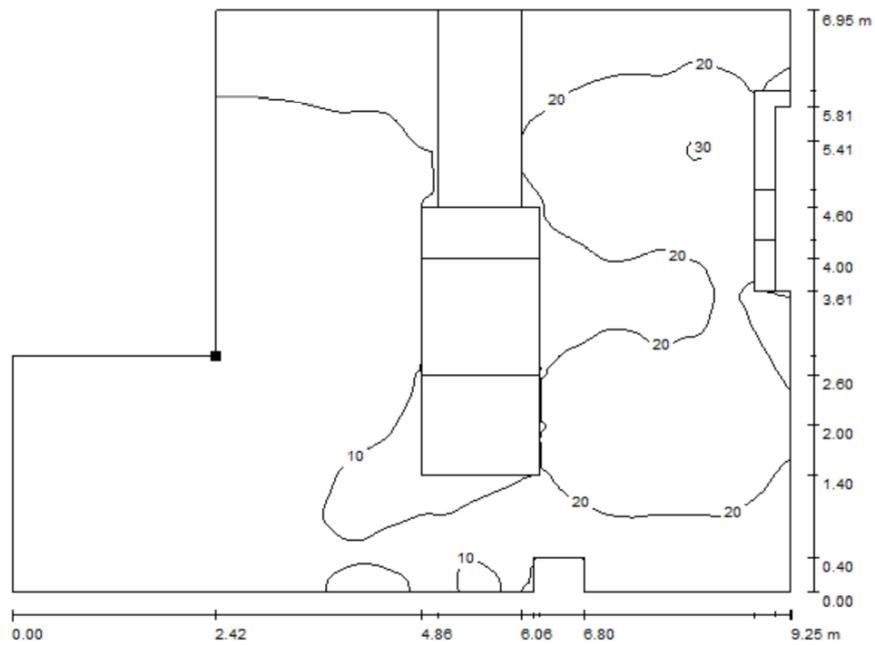


Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	16	1.65	31	0.101	0.054

Figura 19: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Doble Local A (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble A / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:
 Punto marcado:
 (95.192 m, 31.991 m, 0.850 m)



Trama: 128 x 128 Puntos

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
16	1.65	31	0.101	0.054

Figura 20: Isolíneas – Subestación Doble Local A(Obtenido utilizando el software DIALUX®)

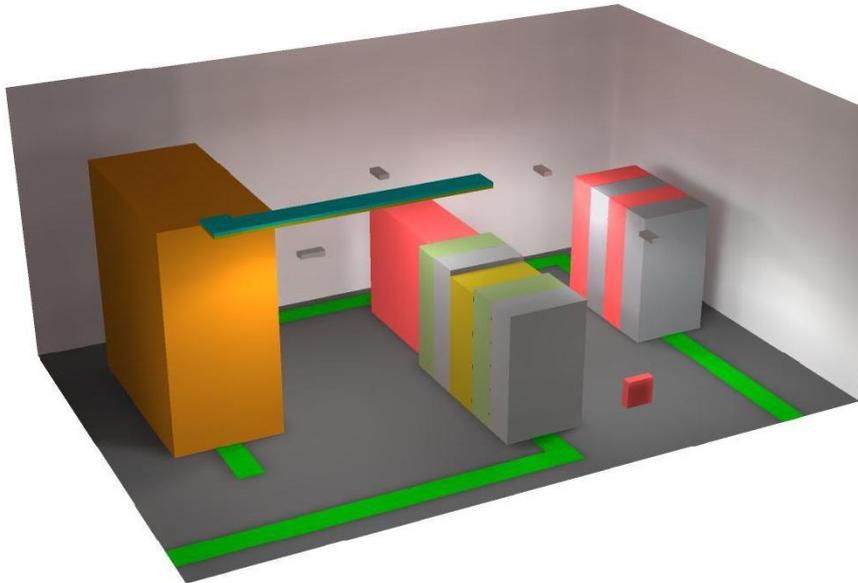


Figura 21: Imagen tridimensional – Subestación Doble Local A(Obtenido utilizando el software DIALUX®)

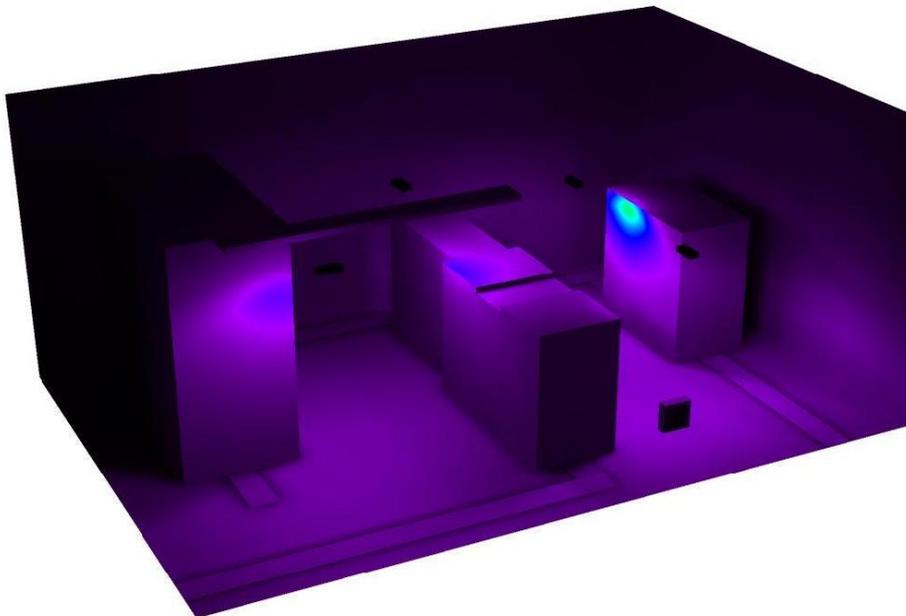


Figura 22: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Doble Local A(Obtenido utilizando el software DIALUX®)

6. Iluminación de la Subestación Doble (Local B)

6.1. Alumbrado normal

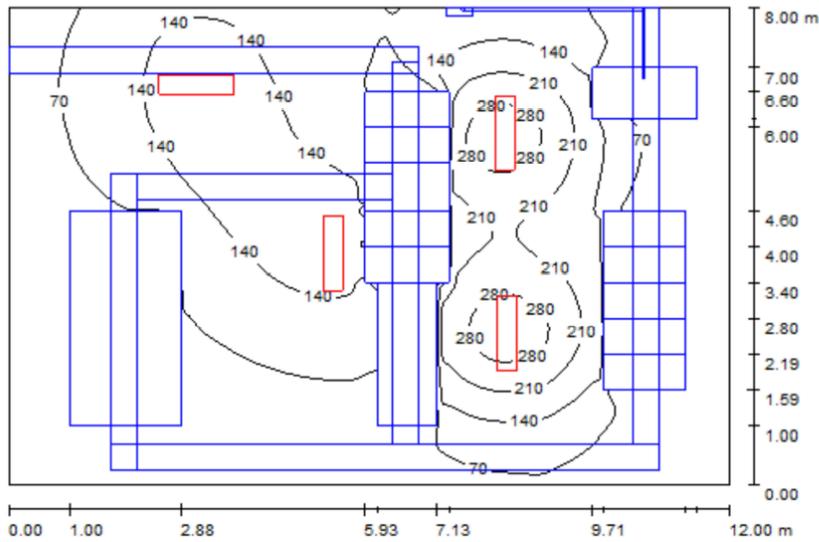
En la Figura 23 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX® sobre la determinación de la cantidad de luminarias necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 24 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 25 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción.

En la Figura 26 se presenta la imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias normales y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 27 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias normales y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.



Altura del local: 5.000 m, Factor mantenimiento: 0.80

Valores en Lux

Superficie	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Plano útil	/	106	1.49	318	0.014
Suelo	20	63	0.77	193	0.012
Techo	70	13	2.86	22	0.212
Paredes (4)	50	23	1.74	180	/

Plano útil:

Altura: 0.850 m
 Trama: 128 x 128 Puntos
 Zona marginal: 0.000 m

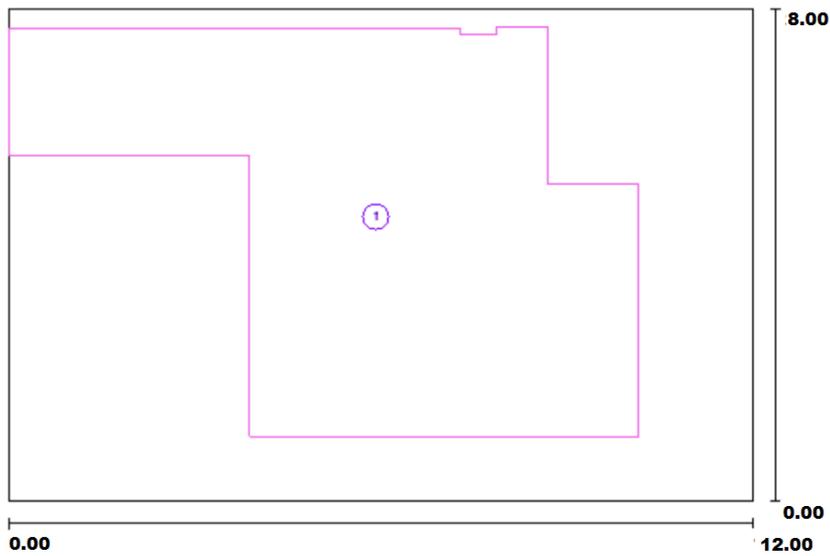
Lista de piezas - Luminarias

Nº	Pieza	Designación (Factor de corrección)	Φ [lm]	P [W]
1	4	3F Filippi 1284 3Fine 2x36 3DEC (1.000)	6700	87.0
Total:			26800	348.0

Valor de eficiencia energética: $3.63 \text{ W/m}^2 = 3.42 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Base: 96.00 m^2)

Figura 23: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble B / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

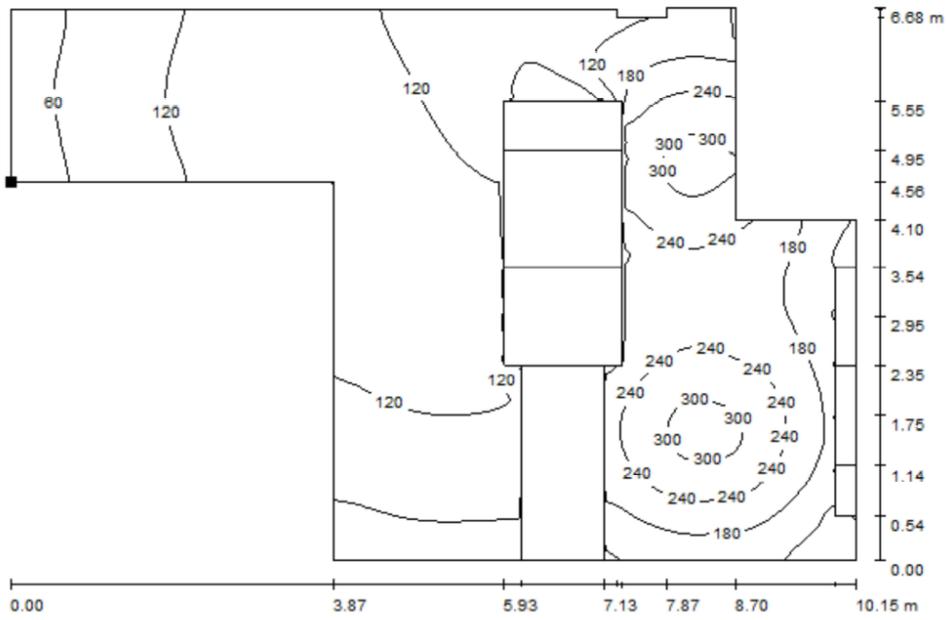


Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	154	35	320	0.227	0.109

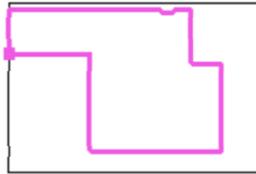
Figura 24: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble B / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:



Trama: 128 x 128 Puntos

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
154	35	320	0.227	0.109

Figura 25: Isolíneas – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

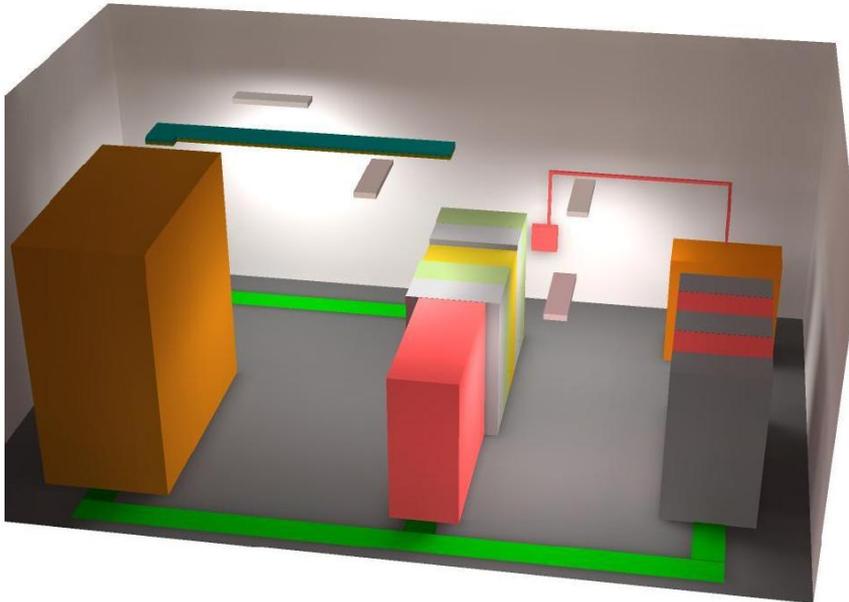


Figura 26: Imagen tridimensional – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

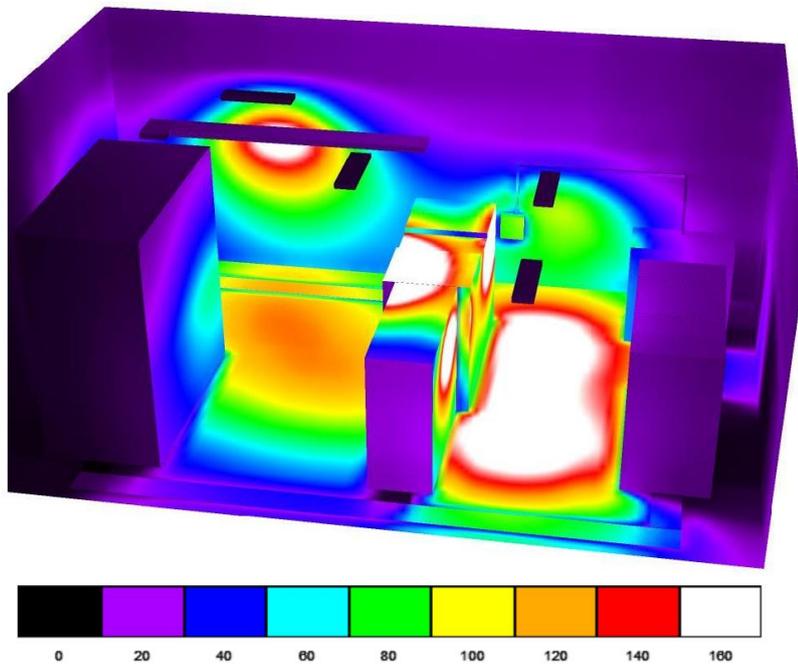


Figura 27: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

6.2. Alumbrado de emergencia

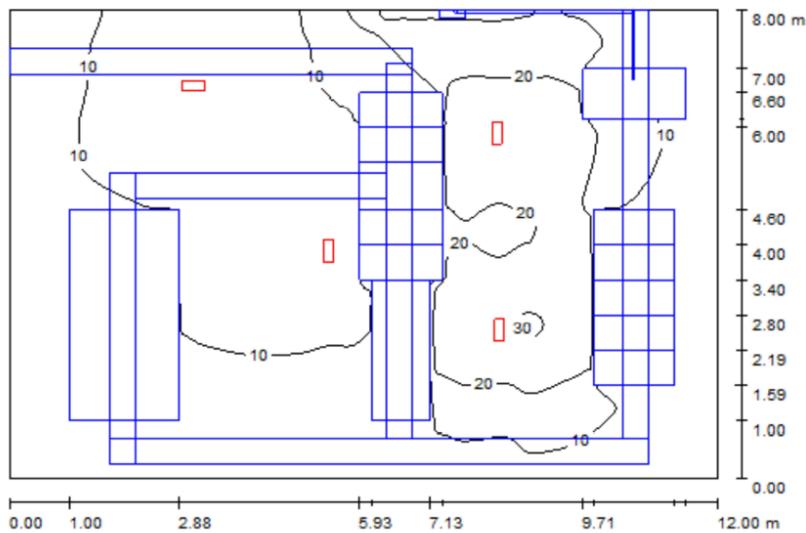
En la Figura 28 se presenta un resumen con el resultado arrojado por el programa DIALUX[®] sobre la determinación de la cantidad de luminarias de emergencia necesarias para obtener los niveles de iluminación deseados.

En la Figura 29 se muestra la superficie utilizada para efectuar los cálculos de iluminación.

En la Figura 30 se pueden apreciar las isolíneas determinadas para la subestación de tracción.

En la Figura 31 se presenta la imagen en tres dimensiones de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados.

En la Figura 32 se puede apreciar una imagen tridimensional en colores falsos de cómo quedaría la subestación de tracción con las luminarias de emergencia y los niveles de iluminación determinados. En la misma se pueden observar los niveles de iluminación en los distintos puntos de la subestación.



Altura del local: 5.000 m, Factor mantenimiento: 0.80

Valores en Lux, Escala 1:103

Superficie	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Plano útil	/	12	0.27	31	0.023
Suelo	20	6.69	0.09	18	0.013
Techo	70	2.43	0.59	4.04	0.242
Paredes (4)	50	4.11	0.28	54	/

Plano útil:

Altura: 0.850 m
 Trama: 128 x 128 Puntos
 Zona marginal: 0.000 m

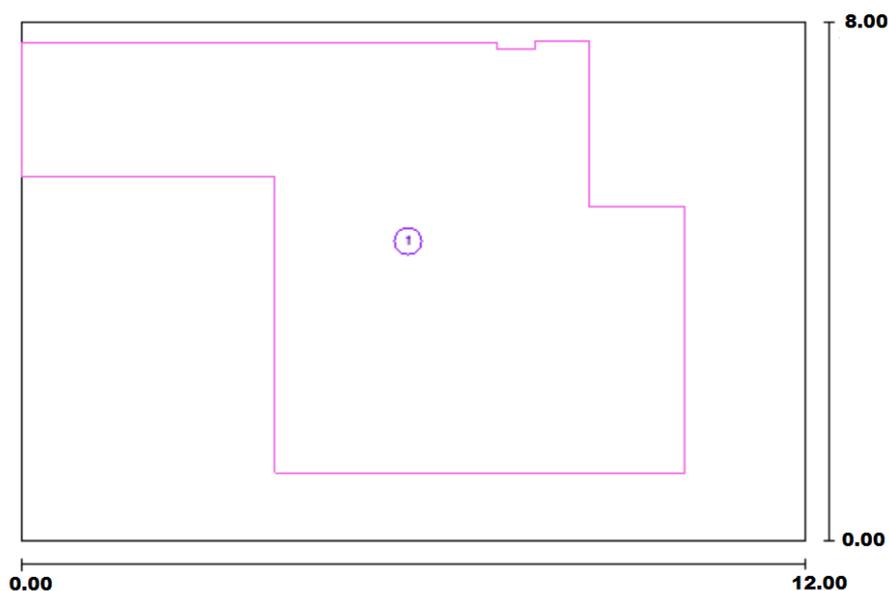
Lista de piezas - Luminarias

Nº	Pieza	Designación (Factor de corrección)	Φ [lm]	P [W]
1	4	Schneider Electric OVA37223E DOMINA 640lm 1h NM IP65 (1.000)	640	24.0
Total:			2560	96.0

Valor de eficiencia energética: $1.00 \text{ W/m}^2 = 8.43 \text{ W/m}^2 / 100 \text{ lx}$ (Base: 96.00 m^2)

Figura 28: Resumen de los niveles de iluminación – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble B / Superficie de cálculo (sumario de resultados)

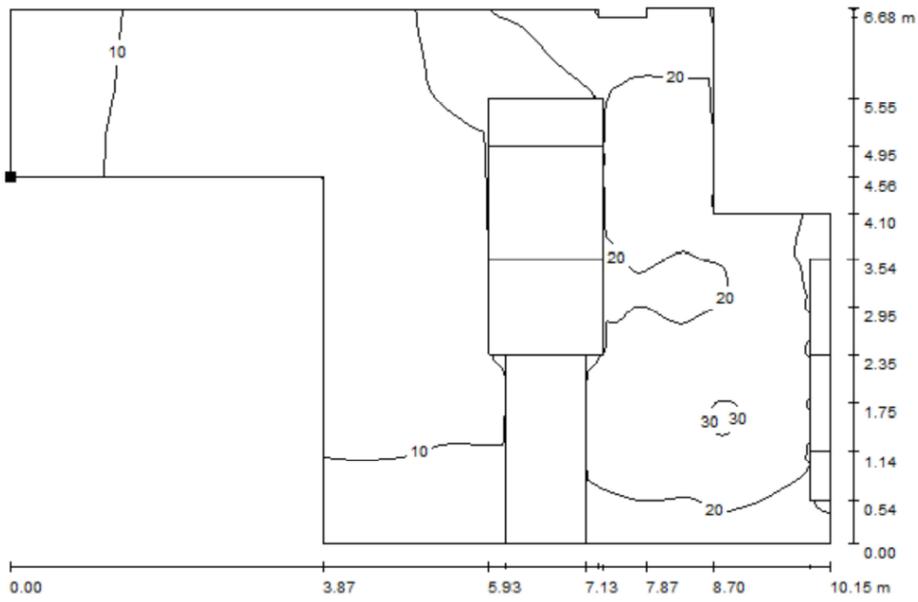


Lista de superficies de cálculo

Nº	Designación	Tipo	Trama	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
1	Superficie de cálculo 1	perpendicular	128 x 128	16	1.95	31	0.122	0.063

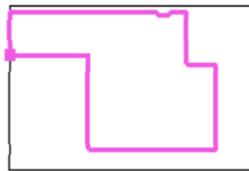
Figura 29: Superficie de cálculo utilizada – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

SB Doble B / Superficie de cálculo 1 / Isolíneas (E, perpendicular)



Valores en Lux

Situación de la superficie en el local:
 Punto marcado:
 (91.704 m, 26.579 m, 0.850 m)



Trama: 128 x 128 Puntos

	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}	
	16	1.95	31	0.122	0.063	
1	4	Schneider Electric OVA37223E DOMINA 640lm 1h NM IP65 (1.000)			640	24.0
Total:					2560	96.0

Valor de eficiencia energética: $1.00 \text{ W/m}^2 = 8.43 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Base: 96.00 m^2)

Figura 30: Isolíneas – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

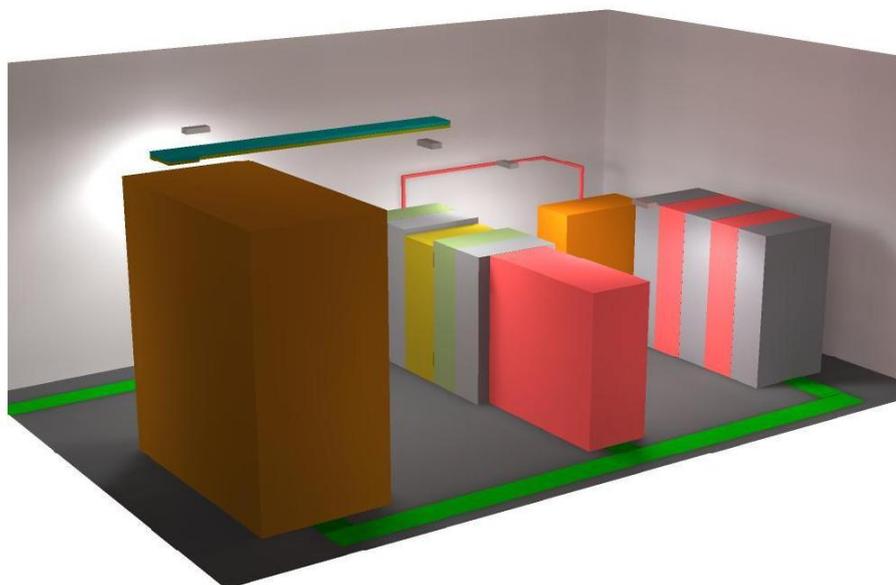


Figura 31: Imagen tridimensional – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

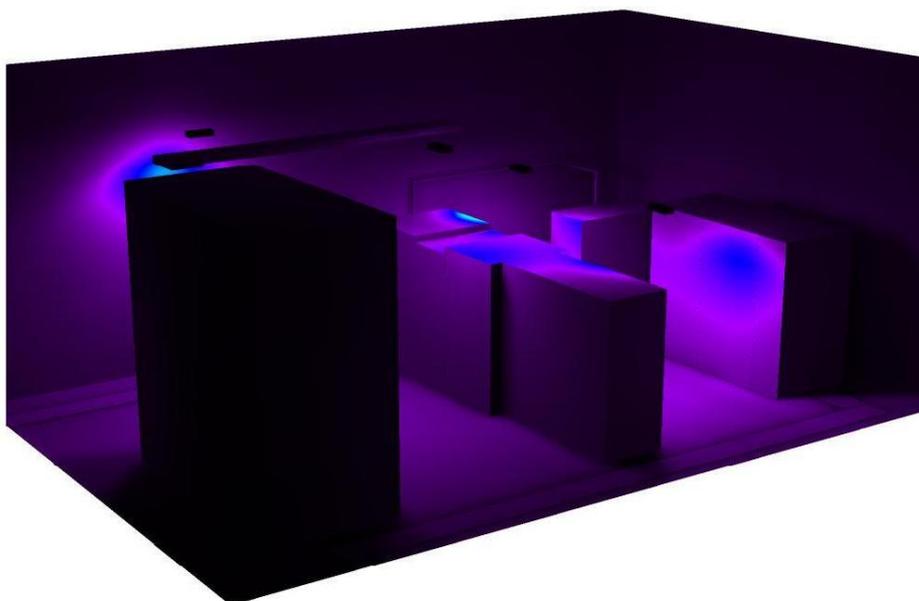


Figura 32: Imagen tridimensional en colores falsos – Subestación Doble Local B (Obtenido utilizando el software DIALUX®)

Anexo C: Memoria Descriptiva

1. Consideraciones

En el proyecto de estructura se deberán tener en cuenta las sobrecargas, peso de equipos, etc. que se mencionan más adelante.

Se deberá tener presente la profundidad de las canalizaciones para pasajes de cables en el momento en que se definan los niveles de fundación.

Para el diseño de la base del transformador se deberá tener en cuenta que el mismo deberá contar con cuba. La capacidad mínima de cada cuba (en caso de estar aisladas) o de ambas (en caso de estar conectadas entre sí) será equivalente al volumen de aceite de cada transformador, lo que se estima en 1.100 litros.

Se deben prever huecos para el pasaje de los conductores de toma de tierra que se irán a conectar a la malla. Estos conductores serán de cobre de 50mm^2 de sección y forrados con PVC color verde-amarillo, y se embutirán mediante caños de PVC $\phi 63\text{mm}$.

La malla se deberá unir adecuadamente a los hierros de la estructura de la edificación, conformando una superficie equipotencial. Las uniones a los pilares deberán ser desconectables e inspeccionables.

En el caso del aterramiento de las aberturas, se ubicará una caja tipo centro. Desde estas cajas hasta las aberturas correspondientes se conectará un cable de cobre de 6mm^2 de sección forrado con PVC verde-amarillo, y en el caso de las puertas, la conexión se realizará con una trenza.

Todos los muros y la azotea deberán llevar capa aislante.

El piso debe ser de hormigón armado de 12cm de espesor mínimo con armadura mínima $\phi 6\text{mm}$ cada 15cm en ambos sentidos o malla electro soldada equivalente.

En la zona donde apoyen las celdas no podrá tener un desnivel mayor que 2mm por metro y 3mm entre los extremos.

Debido al nivel de implantación del local será necesaria la construcción de rampas de acceso desde el camino de ingreso hasta el local y hasta la zona de transformadores. Estas rampas deberán diseñarse para el ingreso de los equipos mediante grúa (transformador) o auto elevador (celdas y tableros). Las mismas deberán contar con una pendiente inferior a 15% y deberá preverse un anclaje para 9 toneladas para facilitar el ascenso o descenso de los transformadores.

Acceso del Personal

El acceso del personal se realizará mediante puerta con celosía de acuerdo a plano adjunto cuyas dimensiones no sean inferiores a 1,00x2,40x0,30m. El local tiene que tener libre acceso para personal de UTE desde la vía pública. Este acceso no debe tener comunicación con otros locales del cliente. Se excluye específicamente el acceso por puerta trampa. Si por alguna razón existiera algún cerramiento que impidiera el libre acceso se deberá colocar en el mismo una abertura de dimensiones mínimas 0,60x1,60m con cerradura suministrada por UTE y manteniendo lo dicho anteriormente.

Acceso para transformadores y equipos

El mismo se realizará mediante puerta con doble hoja y postigos, previéndose de 2,40x1,50m (dimensiones libres). En el caso de que el acceso se realice a través de espacios comunes, los mismos deberán tener una altura mínima de 2,20m para todos los transformadores de hasta 630kVA y 2,40m para los de potencia superior; el ancho deberá ser de 2,50m. En cada caso particular se estudiará el acceso, el que deberá permitir el radio de giro adecuado y los ganchos para arrastre necesarios.

Pesos y medidas aproximadas de los equipos, los que deberán ser tenidos en cuenta en el diseño de la subestación:

NOMBRE	DESCRIPCION	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	ALTURA (cm)	PESO (kg)
RECTIFICADOR	RECTIFICADOR	140.0	80.0	220.0	850
INVERSOR	INVERSOR DC/AC	240.0	100.0	230.0	2600
CELDAS	CELDAS DE MEDIA TENSION	136.5	60.0	242.5	750
DC SWITCH	INTERRUPTORES DE CONTINUA	140.0	60.0	230.0	660
TRANSFORMADOR 3W	TRANSFORMADOR DE 3 BOBINADOS	360.0	187.5	390.0	8600
TRANSFORMADOR 2W - 1	TRANSFORMADOR DE 2 BOBINADOS 16kVA	155.0	80.0	165.0	500
TRANSFORMADOR 2W - 2	TRANSFORMADOR DE 2 BOBINADOS 40kVA	175.0	85.0	185.0	710

2. Tipo de suministro a contratar

Se ha diseñado la instalación eléctrica para un consumo total de $P=2,52\text{MW}$ y $P=5,04\text{MW}$ (en el caso de subestación simple y doble respectivamente), el cual será cubierto contratando a UTE un suministro Trifásico de $2,6\text{MW}$ (subestación simple) y $5,1\text{MW}$ en $31,5\text{kV}$ (Media Tensión).

La conexión a la red se hará a través de una línea de $31,5\text{kV}$, mediante un transformador de tres arrollamientos de $31,5/0,282/0,282\text{kV}$ y $2,5\text{MVA}$ para la alimentación de los tranvías, y un transformador de dos arrollamientos de $31,5/0,4\text{kV}$ y 16kVA o 40kVA (dependiendo de si la subestación de tracción es simple o doble) para alimentar los servicios auxiliares.

3. Sistema de distribución

Se deberá utilizar el sistema de distribución TN-S para el circuito aguas abajo del transformador de servicios auxiliares. Por lo tanto, se tenderán 5 hilos, tres para las fases (R, S, T), neutro (N) y conductor de protección (PE). N y PE se ponen a tierra en el mismo punto (neutro del secundario del transformador de dos arrollamientos).

Para el circuito aguas abajo del transformador de tres arrollamientos, se deberá utilizar el sistema de distribución I-T. De este modo, únicamente las masas se pondrán a tierra mediante conexiones a la malla de puesta a tierra de la subestación.

4. Empresa Instaladora

La empresa a la que se adjudique la obra deberá ser una Empresa Instaladora Autorizada por UTE según el Capítulo XXIV del Reglamento de Baja Tensión, debiendo acreditar su pertenencia a las Categorías A o B allí descritas.

Como requisito adicional deberá acreditar trayectoria de por lo menos 5 años en el mercado local.

Todo el personal afectado a la obra deberá ser idóneo para las tareas a ejecutar, debiendo acreditar formación en Instalaciones Eléctricas y contar con experiencia no menor a 5 años en el área.

5. **Reglamento y Normas a cumplir**

- Reglamento de Baja Tensión de UTE vigente a la fecha.
- Norma de Instalaciones de Enlace de Baja Tensión – UTE vigente a la fecha.
- Ordenanzas municipales:
 - ART. 90).- **ELECTRICAS.-** Las instalaciones eléctricas de estos edificios se ajustarán además a las normas especiales de UTE y a las disposiciones específicas de esta Ordenanza. Los medidores deberán instalarse en lugares de propiedad común, salvo cuando el acceso pueda hacerse en forma directa desde la vía pública. Las líneas generales y ramales de alimentación podrán ir exteriores, únicamente por lugares de propiedad común, los puntos de accesos, los empalmes de los ramales, tableros, etc, de uso general solo podrán estar ubicados en lugares de propiedad común.
- Normas IEC: En función de los materiales que se elijan.

6. Materiales

- Tableros

El diseño de los tableros eléctricos responderá a las características de un Conjunto de Serie o Conjunto Derivado de Serie conforme a la definición de la norma IEC 60439 del Comité Electrotécnico Internacional, cumpliendo con los requerimientos de ensayos de tipo establecidos por las mismas.

Los tableros serán instalados en el interior de locales adecuados.

La instalación de cada aparato o grupo de aparatos incluirá los elementos mecánicos y eléctricos de acometida, soporte, protección y salida que contribuyan a la ejecución de una sola función (“unidad funcional”). El conjunto de las diversas unidades funcionales permitirá la ejecución de un conjunto o sistema funcional.

Los componentes prefabricados deberán permitir la estandarización de los montajes y conexiones, simplificar la intercambiabilidad y el agregado de unidades funcionales.

Brindarán protección al personal y seguridad de servicio. Tendrán una disposición simple de aparatos y componentes y su operación será sencilla a fin de evitar confusiones.

El tablero tendrá las siguientes características:

- Tensión de empleo: 400 V
- Tensión de aislamiento: 1000 V
- Corriente nominal: De acuerdo al unifilar
- Corriente de cresta: 75 kA
- Frecuencia: 50 Hz
- Grado de protección IP31

Condiciones Ambientales:

- Temperatura Máxima 40 °C
- Temperatura Mínima -5 °C
- Humedad relativa Ambiente máxima 95 %
- Altitud <1000 m

El proyecto ejecutivo final del tablero es de responsabilidad de la empresa proveedora del mismo.

- Canalizaciones

Para cables subterráneos, se construirán canales pasacables de 50cm de ancho por 100cm de profundidad dentro de la subestación. Los mismos deberán ser tapados.

Para cables de fuerza motriz, se utilizarán caños rígidos livianos de hierro galvanizado de la sección que corresponda.

Para cables de iluminación, se utilizarán caños rígidos livianos de hierro galvanizado de la sección que corresponda.

Para conductores de distribución de tableros de servicios auxiliares y alimentación de los rectificadores, se utilizarán bandejas perforadas de las dimensiones que correspondan (según indican los planos).

- Dispositivos de Maniobra y Protección

Todos los dispositivos de protección en Baja Tensión deberán ser Interruptores Automáticos Termomagnéticos que cumplan con las normas IEC/EN 60947-2 y de marca reconocida.

- Conductores

Los conductores a utilizar para cada uno de los circuitos de la subestación serán los que se presentan en la Memoria de Cálculo. Para el caso de Media Tensión, los conductores serán de aluminio, mientras que para Baja Tensión los mismos serán de cobre. En todos los casos los conductores a utilizar deben cumplir con las normas IEC 60364, NFC 15100 y NBR 5410 y deben ser de marca reconocida.

- Luminarias

Para la iluminación de las subestaciones de tracción se utilizarán 4 luminarias con lámparas fluorescentes de 2x36W y su ubicación se presenta en los planos adjuntos. Las mismas deberán ser de marca reconocida.

- Celdas de Media Tensión

Todas las celdas de Media Tensión que se instalarán deberán ser con interruptor automático y seccionador de puesta a tierra. El tiempo de apertura del interruptor automático deberá ser inferior a 45ms y su poder de corte no podrá ser inferior a 25kA.

Las celdas deberán incluir indicadores de presencia de tensión y todos los elementos de protección y medida que se presentan en los unifilares adjuntos. Las mismas deberán ser de marca reconocida.

- Protecciones Diferenciales

Para la protección contra Contactos Directos se utilizarán Interruptores Diferenciales riel din que cumplan con las normas IEC/EN 61008 y de marca reconocida.

- Extractores

Para ventilar las subestaciones se deberán colocar dos extractores: uno para el ingreso de flujo de aire y otro para el egreso. Los mismos deberán ser extractores helicoidales trifásicos con hélice de aluminio y filtro de polvo. Los mismos deberán ser elegidos según las especificaciones adjuntas en la Memoria de Cálculo.

- Materiales para la Puesta a Tierra

Para la Puesta a Tierra se irá a realizar una grilla con cuadrados de 4x4m según se indica en los planos adjuntos. A lo largo del perímetro de la misma se van a enterrar jabalinas de cobre de 2,5m de largo y 5/8” de diámetro tal como indican los planos.

El cable a utilizar para la malla de Puesta a Tierra será de cobre desnudo de 50mm² de sección. Todas las uniones se realizarán mediante soldaduras exotérmicas.

La Puesta a Tierra debe cumplir con el Reglamento de Baja Tensión de UTE vigente a la fecha.

Una vez realizada la Puesta a Tierra, se medirá la resistencia de la misma con motivo de obtener un valor más exacto y así poder cumplir eficientemente con las normas de seguridad correspondientes.

El Neutro del transformador de servicios auxiliares deberá ir aterrado mediante una jabalina de iguales características a las utilizadas para la malla de puesta a tierra, y conectada a la grilla mediante un cable de cobre desnudo de 50mm² de sección.

Todas las masas de la instalación deberán conectarse a la malla de puesta a tierra mediante dos uniones diferentes con cable de cobre desnudo de 50mm² de sección, a excepción de la instalación de Baja Tensión destinada a servicios auxiliares.

Para este caso, se derivará un conductor de protección de cobre de la sección que corresponda (según unifilares adjuntos) desde el Neutro del transformador de servicios

auxiliares hacia la Barra de Tierra ubicada dentro del Tablero de Servicios Auxiliares. Desde la Barra de Tierra del Tablero de Servicios Auxiliares, se derivarán cables de protección hacia las cargas, ya sean de iluminación, tomas o fuerza motriz.

Las secciones de los conductores de protección deberán ser las que se indican en los unifilares correspondientes.

7. **Listado de Planos**

- Plano 1 – Puesto de Conexión y Medida en 30kV - UTE
- Plano PCPC-2 – Plano de Planta – Subestación Simple
- Plano PCPC-3 – Subestación Simple – Corte A
- Plano PCPC-4 – Subestación Simple – Corte B
- Plano PCPC-5 – Plano de Planta – Subestación Doble
- Plano PCPC-6 – Subestación Doble – Corte A
- Plano PCPC-7 – Subestación Doble – Corte B
- Plano PECA-2 – Plano de Canales – Subestación Simple
- Plano PECA-3 – Plano de Canales – Subestación Doble
- Plano PECA-4 – Plano de Bandejas – Subestación Simple
- Plano PECA-5 – Plano de Bandejas – Subestación Doble
- Plano PEPT-2 – Malla de Puesta a Tierra – Subestación Simple
- Plano PEPT-3 – Malla de Puesta a Tierra – Subestación Doble
- Plano PEUN-2 – Unifilar Subestación Simple
- Plano PEUN-3 – Unifilar Subestación Doble con Transformador de Servicios Auxiliares
- Plano PEUN-4 – Unifilar Subestación Doble sin Transformador de Servicios Auxiliares
- Plano PEUN-5 – Unifilar Tablero de Servicios Auxiliares – Subestación Simple
- Plano PEUN-6 – Unifilar Tablero de Servicios Auxiliares – Subestación Doble
- Plano PEUN-7 – Rectificador de 12 Pulsos
- Plano PESA-2 – Plano de Servicios Auxiliares – Subestación Simple
- Plano PESA-3 – Plano de Servicios Auxiliares – Subestación Doble

Anexo D: Memoria de Cálculo

1. Cálculo de los extractores

Para ventilar las subestaciones se deberán colocar dos extractores: uno para el ingreso de flujo de aire y otro para el egreso. Los mismos deberán ser extractores helicoidales trifásicos con hélice de aluminio y filtro de polvo.

Los mismo deberán ser elegidos según el caudal de aire que sean capaces de extraer. Para ello, dado que se quiere una ventilación con presiones equilibradas, el caudal de aire de entrada debe ser igual al caudal de aire de salida. El caudal de aire de cada extractor se deberá calcular según la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P_o + P_{CC}) \cdot 3600}{c_T \cdot \Delta T}$$

En donde P_o y P_{CC} corresponden a las pérdidas en vacío y en cortocircuito respectivamente de los aparatos eléctricos y máquinas dentro de la subestación (en kW), c_T es la capacidad térmica específica del aire referida al volumen ($c_T = 1,3 \frac{kW \cdot s}{m^3 \cdot K}$) y $\Delta T = T_{max} - T_a$ con T_{max} la temperatura máxima del aire saliente y T_a la temperatura del aire entrante. Se asume una temperatura de entrada del aire $T_a=30^\circ C$ y una temperatura máxima del aire saliente de $T_{max}=42^\circ C$.

Se deberán elegir los extractores a instalar según el caudal de aire que sean capaces de extraer, suponiendo un rendimiento de los mismos de $\eta=0,5$.

2. Determinación de las curvas de las protecciones de Media Tensión

Para determinar las curvas de las protecciones de Media Tensión de las subestación de tracción se utilizará la Curva Inversa (SIT).

- **Subestación 5 (simple)**

El orden de selectividad de la apertura de los interruptores automáticos de las celdas de Media Tensión es el siguiente (los nombres de los interruptores están acordes al unifilar adjunto):

$$Q_G > Q_1, Q_2, Q_3$$

En donde Q_G corresponde al interruptor de la celda de llegada desde el puesto de conexión y medida, Q_1 corresponde al interruptor de la celda de salida hacia el transformador de servicios auxiliares, Q_2 corresponde al interruptor de la celda de salida al inversor y Q_3 corresponde al interruptor de la celda de salida al transformador de 3 arrollamientos.

Se elige esta selectividad de modo que, ante una falta aguas abajo de los interruptores Q_1 , Q_2 o Q_3 , primero abran dichos interruptores, y en caso de que falle dicha apertura, que el interruptor aguas arriba (en este caso, el interruptor Q_G) sea el que despeje la falta.

En la Tabla 1 se presentan las corrientes nominales de cada salida y las corrientes de cortocircuito mínimas para las salidas de la subestación 5 en los secundarios de los transformadores de corriente de protección:

Salida	I_n (A)	I_{ccmin} (A)
Transformador 2W	0,3	3,6
Transformador 3W	45,8	77,7
Inversor	6,9	3912,9
Llegada desde PCyM	53,0	392,3

Tabla 1: Corrientes nominales de las salidas y corrientes de cortocircuito mínimas

La curva de la protección del interruptor Q_G se determinará considerando que la corriente nominal es la suma de las corrientes nominales de todas las salidas de la subestación.

Se admitirá una sobrecarga del 20%, con lo cual la protección $I>$ queda determinada para una corriente de 1,2 veces la nominal de la salida. Sin embargo, dado que la corriente nominal que circula por el cable de alimentación desde la celda de Media Tensión hacia el transformador de servicios auxiliares es muy baja, se decide que la protección contra sobrecorriente la realice el interruptor general del Tablero de Servicios Auxiliares. Por lo tanto, el interruptor de la celda de MT de salida al transformador de servicios auxiliares únicamente cumplirá la función de protección contra cortocircuito.

A su vez, se desea que la apertura instantánea de la protección se produzca para una corriente 20% menor a la corriente de cortocircuito mínima, con lo cual queda determinada una cota superior para $I>>$ de 0,8 veces la corriente mínima de cortocircuito. Como criterio de diseño, se determina la corriente $I>>$ de la protección Q_G y se setea la protección del resto de las protecciones al menos 500A por debajo de ésta.

Asimismo, para los interruptores Q_1 , Q_2 y Q_3 se fijará el tiempo de actuación de la protección en 100ms para $I=I>>$, mientras que el tiempo de actuación del interruptor Q_G debe estar por lo menos 200ms por encima del tiempo de actuación de las protecciones aguas abajo (en este caso Q_1 , Q_2 y Q_3) para todos los puntos de la curva, de modo de obtener la selectividad deseada.

Todos estos valores anteriormente mencionados son determinados por medio de criterios empíricos, y se muestran en la Tabla 2:

Salida	$I>$ (A)	$I>>_{max}$ (A)	t (ms)	$I>>$ (A)
Transformador 2W	---	2,9	100	2,9
Transformador 3W	5,5	62,1	100	62,1
Inversor	4,1	3130,3	100	2888,5
Llegada desde PCyM	3,2	313,8	300	313,8

Tabla 2: Corrientes de apertura temporizada y máxima y tiempo de apertura de las protecciones

La fórmula definida en la Norma CEI 255-3 / BS-142 para la Curva Inversa es la siguiente:

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right]} \cdot \frac{T}{2,97} \quad (1)$$

En donde t es el valor del tiempo de actuación de la protección (en s), T es la temporización de la protección a 10 veces I_s e I_s es el umbral de intensidad ($I>$). T varía en un rango de 100ms a 4s con intervalos de 10ms.

Utilizando la ecuación (1) se halla T para la protección Q_G . El mismo debe ser normalizado al valor inmediatamente superior y, utilizando este valor normalizado, mediante la ecuación (1) se determina el tiempo de actuación de la protección, t.

Además, debe verificarse que para $I=I>>$ el tiempo de apertura de la protección se encuentre al menos 200ms por encima del tiempo de apertura de las protecciones inmediatamente aguas abajo.

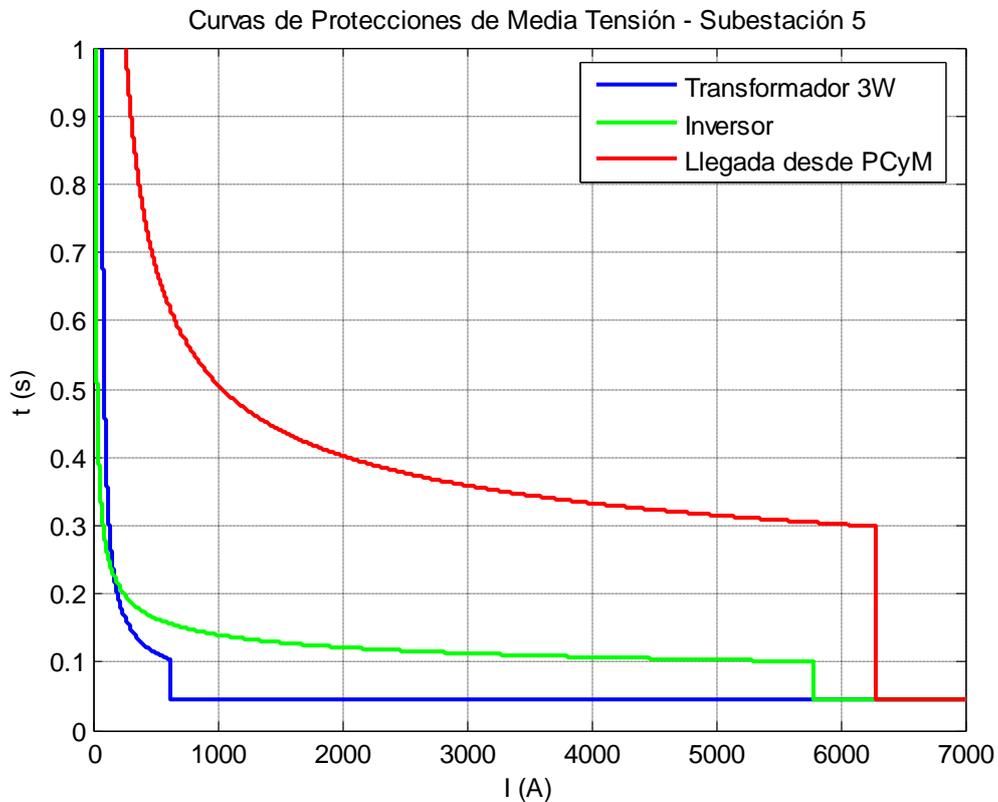
En la Tabla 3 se resumen los tiempos de actuación de las protecciones:

Salida	T (s)	T normalizado (s)	t (ms)	$t_{I>>}$ (ms)	$t_{I=I>>}$ (ms)
Transformador 2W	---	---	100	45	100
Transformador 3W	0,105	0,11	104	45	104
Inversor	0,297	0,30	101	45	101
Llegada desde PCyM	0,601	0,61	305	45	299

Tabla 3: Tiempos de actuación de las protecciones

Como se puede ver en la Tabla 3, la protección Q_G actúa con una diferencia de tiempo mayor a 200ms para las corrientes $I=288,8A$ (mayor $I>>$ de las protecciones aguas abajo pasada al secundario del transformador de corriente de la celda de llegada desde el PCyM) e $I=313,8A$ ($I>>$ de la protección Q_G).

En la Gráfica 1 se pueden apreciar las curvas de los diferentes interruptores de Media Tensión:



Gráfica 1: Curvas de protecciones de Media Tensión – Subestación 5

- **Subestaciones 1 y 2 (doble)**

El orden de selectividad de la apertura de los interruptores automáticos de las celdas de Media Tensión es el siguiente (los nombres de los interruptores están acordes al unifilar adjunto):

$$Q_{G-SSEE1}, Q_{G-SSEE2} > Q_{4-SSEE1}, Q_{3-SSEE2} > Q_{1-SSEE1}, Q_{2-SSEE1}, Q_{3-SSEE1}, Q_{1-SSEE2}, Q_{2-SSEE2}$$

En donde la subestación 1 es la que tiene el transformador de servicios auxiliares y la subestación 2 la que no lo tiene. $Q_{G-SSEE1}$ y $Q_{G-SSEE2}$ corresponden a los interruptores de las celdas de llegada desde los Puestos de Conexión y Medida, $Q_{4-SSEE1}$ y $Q_{3-SSEE2}$ corresponden a los interruptores de las celdas de salida hacia las

subestaciones 2 y 1 respectivamente, $Q_{1-SSEE1}$ corresponde al interruptor de la celda de salida al transformador de servicios auxiliares, $Q_{2-SSEE1}$ y $Q_{1-SSEE2}$ corresponden a los interruptores de las celdas de salida a los inversores, $Q_{3-SSEE1}$ y $Q_{2-SSEE2}$ corresponden a los interruptores de las celdas de salida a los transformadores de 3 arrollamientos.

Se elige esta selectividad de modo que, ante una falta aguas abajo de los interruptores de salida a los transformadores o a los inversores, primero abran dichos interruptores, y en caso de que falle dicha apertura, que el interruptor aguas arriba (en este caso, los interruptores $Q_{G-SSEE1}$ o $Q_{G-SSEE2}$) sea el que despeje la falta.

Ahora bien, como se puede apreciar en el orden de selectividad determinado, se ha decidido que las protecciones de los cables que se conectan entre subestaciones abran en un tiempo mayor que los interruptores de los transformadores y de los inversores. Esto se debe a que, en el caso en que una de las subestaciones se encuentre alimentada a través de la otra (por ejemplo, la subestación 1 se encuentre alimentada desde la subestación 2 a través del cable de interconexión entre ellas) y llegase a ocurrir una falta aguas abajo de los interruptores de salida de la subestación 1 a los transformadores o al inversor, es de interés que antes de que se produzca la apertura de $Q_{G-SSEE2}$ se produzca la apertura de $Q_{4-SSEE1}$ o $Q_{3-SSEE2}$, de modo tal que la subestación 1 sea la que permanezca aislada y no ambas subestaciones (todo esto se da en el caso en que falle la apertura de los interruptores de salida a los transformadores o al inversor).

En la Tabla 4 se presentan las corrientes nominales de cada salida y las corrientes de cortocircuito mínimas para las salidas de las subestaciones 1 y 2 en los secundarios de los transformadores de corriente de protección:

Subestación	Salida	I_n (A)	I_{ccmin} (A)
Subestación 1	Transformador 2W	0,7	9,1
	Transformador 3W	45,8	79,6
	Inversor	6,9	5227,7
	Salida a otra SSEE	53,4	1045,9
	Llegada desde PCyM	106,1	523,5
Subestación 2	Transformador 3W	45,8	79,6
	Inversor	6,9	5227,7
	Salida a otra SSEE	53,4	1045,9
	Llegada desde PCyM	106,1	523,5

Tabla 4: Corrientes nominales de las salidas y corrientes de cortocircuito mínimas

La curva de la protección de los interruptores $Q_{G-SSEE1}$ y $Q_{G-SSEE2}$ se determinará considerando que la corriente nominal es la suma de las corrientes nominales de todas las salidas de las dos subestaciones.

Como se puede apreciar en la Tabla 4, los valores de las corrientes tanto nominales como de cortocircuito resultan ser iguales para ambas subestaciones. Por lo tanto, se continuará el estudio para la subestación con transformador de servicios auxiliares (subestación 1), seteando los interruptores de la subestación 2 con los mismos valores que los interruptores correspondientes en la subestación 1.

Para el diseño de las curvas de protecciones se tendrán en cuenta las mismas consideraciones de diseño que para la subestación 5 (simple).

En la Tabla 5 se pueden apreciar las corrientes de apertura temporizada e instantánea de las diferentes protecciones:

Salida	$I > (A)$	$I >>_{max} (A)$	$t (ms)$	$I >> (A)$
Transformador 2W	---	7,3	100	7,3
Transformador 3W	5,5	63,7	100	63,7
Inversor	4,1	4182,1	100	3688,1
Salida a otra SSEE	6,4	836,7	300	787,6
Llegada desde PCyM	6,4	418,8	500	418,8

Tabla 5: Corrientes de apertura temporizada y máxima y tiempo de apertura de las protecciones

Utilizando la ecuación (1) se halla T para la protección Q_G . El mismo debe ser normalizado al valor inmediatamente superior y, utilizando este valor normalizado, mediante la ecuación (1) se determina el tiempo de actuación de la protección, t .

Además, debe verificarse que para $I=I >>$ el tiempo de apertura de la protección del interruptor de llegada desde el Puesto de Conexión y Medida se encuentre al menos 200ms por encima del tiempo de apertura de las protecciones de salida hacia la otra subestación, y el tiempo de apertura de esta última protección deberá encontrarse 200ms por encima del tiempo de apertura de las protecciones de las restantes salidas.

En la Tabla 6 se resumen los tiempos de actuación de las protecciones:

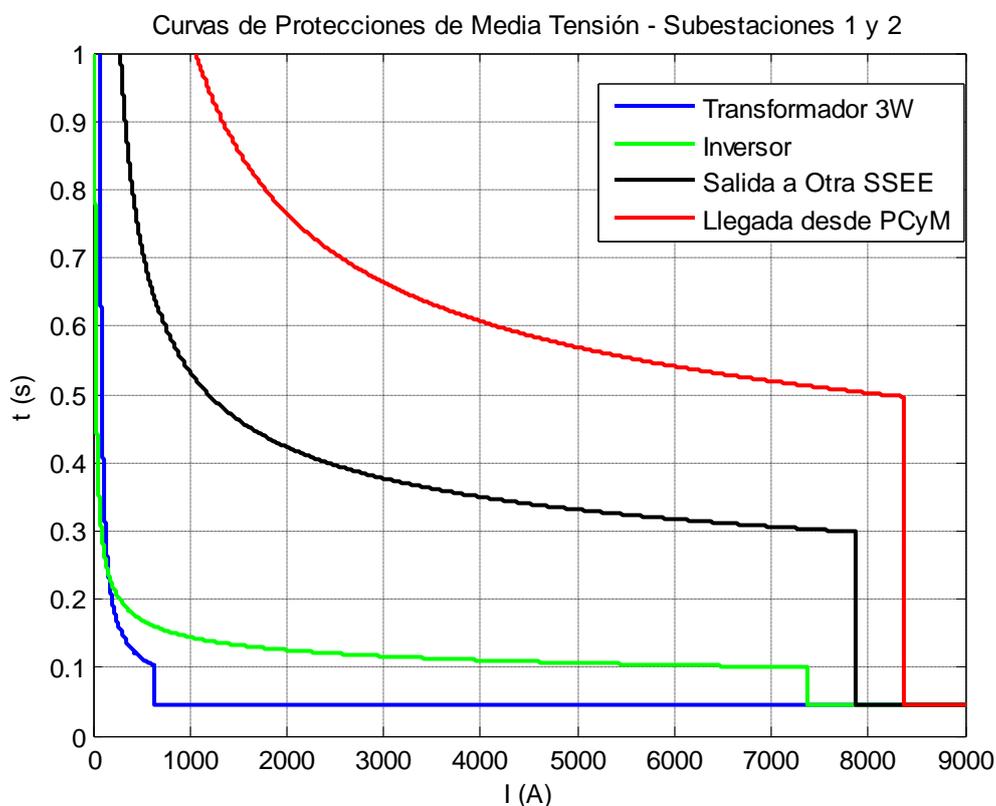
Salida	$T (s)$	T normalizado (s)	$t (ms)$	$t_{I >>} (ms)$	$t _{I=I >>} (ms)$
Transformador 2W	---	---	100	45	100
Transformador 3W	0,107	0,11	103	45	103
Inversor	0,309	0,31	100	45	100
Salida a otra SSEE	0,634	0,64	303	45	299
Llegada desde PCyM	0,912	0,92	504	45	497

Tabla 6: Tiempos de actuación de las protecciones

Como se puede ver en la Tabla 6, la protección Q_G actúa con una diferencia de tiempo mayor a 200ms para las corrientes $I=393,8A$ ($I >>$ de la protección de la salida a la otra subestación pasada al secundario del transformador de corriente de la celda de llegada desde el PCyM) e $I=418,8A$ ($I >>$ de la protección Q_G).

Asimismo, de la Tabla 6 se desprende que la protección Q₄ (protección de la salida a la otra subestación) actúa con una diferencia de tiempo mayor a 200ms para las corrientes I=737,6A (mayor I>> de las protecciones de las restantes salidas pasada al secundario del transformador de corriente de la celda de salida a la otra subestación) e I=787,6A (I>> de la protección Q₄).

En la Gráfica 2 se pueden apreciar las curvas de los diferentes interruptores de Media Tensión:



Gráfica 2: Curvas de protecciones de Media Tensión – Subestaciones 1 y 2

- **Subestaciones 3 y 4 (doble)**

Se realiza el mismo procedimiento que para las subestaciones 1 y 2. En las Tablas 7, 8 y 9 se presentan los datos correspondientes.

Subestación	Salida	I_n (A)	I_{ccmin} (A)
Subestación 3	Transformador 2W	0,7	9,1
	Transformador 3W	45,8	80,3
	Inversor	6,9	5910,3
	Salida a otra SSEE	53,4	1182,5
	Llegada desde PCyM	106,1	591,9
Subestación 4	Transformador 3W	45,8	80,3
	Inversor	6,9	5910,3
	Salida a otra SSEE	53,4	1182,5
	Llegada desde PCyM	106,1	591,9

Tabla 7: Corrientes nominales de las salidas y corrientes de cortocircuito mínimas

Salida	$I>$ (A)	$I>>_{max}$ (A)	t (ms)	$I>>$ (A)
Transformador 2W	---	7,3	100	7,3
Transformador 3W	5,5	64,3	100	64,3
Inversor	4,1	4728,3	100	4235,4
Salida a otra SSEE	6,4	946,0	300	897,1
Llegada desde PCyM	6,4	473,5	500	473,5

Tabla 8: Corrientes de apertura temporizada y máxima y tiempo de apertura de las protecciones

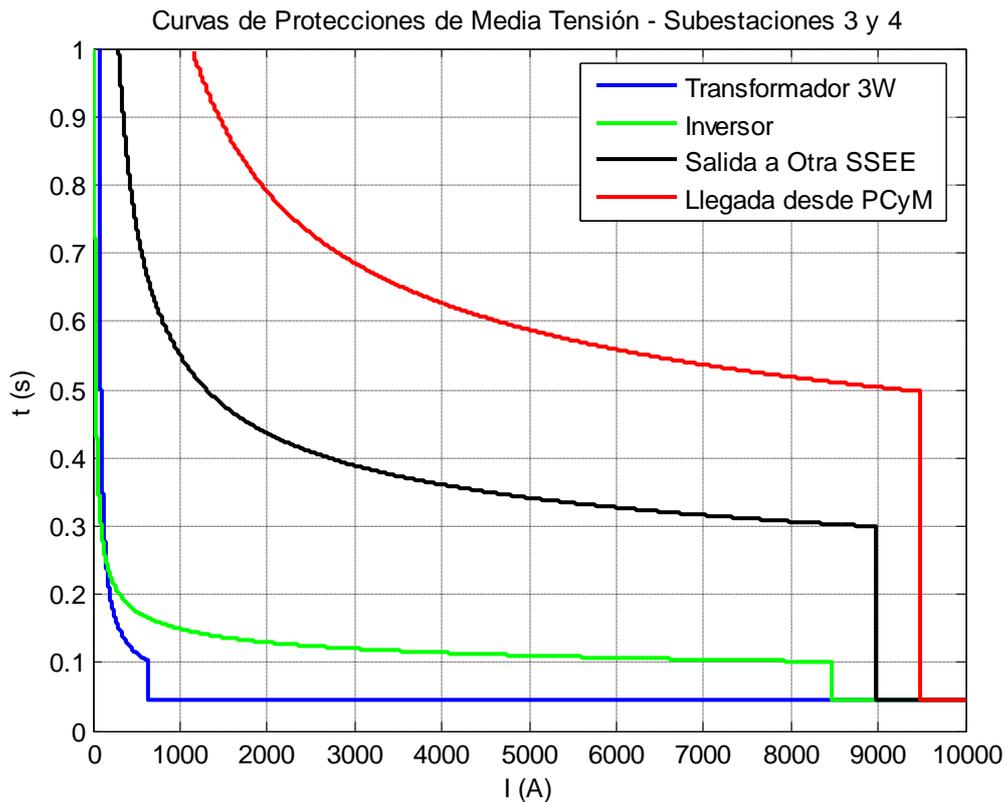
Salida	T (s)	T normalizado (s)	t (ms)	$t_{I>>}$ (ms)	$t_{I=I>>}$ (ms)
Transformador 2W	---	---	100	45	100
Transformador 3W	0,107	0,11	103	45	103
Inversor	0,316	0,32	101	45	101
Salida a otra SSEE	0,653	0,66	303	45	300
Llegada desde PCyM	0,942	0,95	504	45	498

Tabla 9: Tiempos de actuación de las protecciones

Como se puede ver en la Tabla 9, la protección Q_G actúa con una diferencia de tiempo mayor a 200ms para las corrientes $I=448,5A$ ($I \gg$ de la protección de la salida a la otra subestación pasada al secundario del transformador de corriente de la celda de llegada desde el PCyM) e $I=473,5A$ ($I \gg$ de la protección Q_G).

Asimismo, de la Tabla 9 se desprende que la protección Q_4 (protección de la salida a la otra subestación) actúa con una diferencia de tiempo mayor a 200ms para las corrientes $I=847,1A$ (mayor $I \gg$ de las protecciones de las restantes salidas pasada al secundario del transformador de corriente de la celda de salida a la otra subestación) e $I=897,1A$ ($I \gg$ de la protección Q_4).

En la Gráfica 3 se pueden apreciar las curvas de los diferentes interruptores de Media Tensión:



Gráfica 3: Curvas de protecciones de Media Tensión – Subestaciones 3 y 4

3. Listado de Planillas de Cálculo

- Tablero de Servicios Auxiliares – Subestación Simple
- Tablero de Servicios Auxiliares – Subestación Doble
- Celdas de Media Tensión – Subestaciones 1 y 2
- Celdas de Media Tensión – Subestaciones 3 y 4
- Celdas de Media Tensión – Subestación 5
- Cable desde Transformador de 2 arrollamientos a Tablero SSAA – Subestaciones 1 y 2
- Cable desde Transformador de 2 arrollamientos a Tablero SSAA – Subestaciones 3 y 4
- Cable desde Transformador de 2 arrollamientos a Tablero SSAA – Subestación 5
- Cable desde Transformador de 3 arrollamientos a Rectificador – Subestaciones 1 y 2
- Cable desde Transformador de 3 arrollamientos a Rectificador – Subestaciones 3 y 4
- Cable desde Transformador de 3 arrollamientos a Rectificador – Subestación 5

Referencias

- [1] A. Pizzini (2011) - *Inversores* - Curso de Electrónica de Potencia 2011 – Facultad de Ingeniería - UdelaR
- [2] ABB (2011) - *Catalogo Técnico System pro M compact*
- [3] Alamys (2005) - Recuperado en Noviembre 2011 de http://www.alamys.org/Documentos/asamb_xix_medellin/metro.pdf (pág. 8, 9, 10, 12)
- [4] Alejandro Benito i Rusiñol (2010). *Red de ferrocarril/Catenarias*. Recuperado en 2012 de <http://electricidad-viatger.blogspot.com/2010/03/red-de-ferrocarril.html>
- [5] AlmadeHerrero (2012). *Pantógrafos y aisladores*. Recuperado en Agosto 2012 de <http://almadeherrero.blogspot.com/2012/08/pantografos-y-aisladores.html>
- [6] AlmadeHerrero (2012) - Recuperado en Agosto 2012 de http://almadeherrero.blogspot.com/2012_08_01_archive.html
- [7] ALSTOM (2011) - *Citadis Dualis*
- [8] ALSTOM (2011) - *Citadis: Diseñando Ciudades*
- [9] ALSTOM (2011) - *Presentación de Alstom Transporte* - Junio 2011 – Alstom
- [10] ALSTOM (2011) - *Secciones Tranviarias*
- [11] ALSTOM (2012) - *HESOP Braking for Power*
- [12] ALSTOM (2012) - Recuperado en Marzo 2012 de www.alstom.com/transport
- [13] Andrés Pizarro (2005) - *Diálogo regional sobre transporte urbano*

[14] Andrés Pizarro (2005). Banco Mundial. *BRT vs LRT. Comparación de tecnologías para ejes de transporte público masivo*(p. 29).

[15] Anónimo - Recuperado en Marzo 2009 de http://www.arthursclipart.org/transport/land/page_05.htm

[16] Anónimo (2011) - *Presentación SYSTRA & FASEP Montevideo 2011*

[17] Anónimo (2012) - *Cálculo de las corrientes de cortocircuito* - Curso de Instalaciones Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[18] Anónimo (2012) - *Canalizaciones Eléctricas* - Curso de Instalaciones Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[19] Anónimo (2012) - *Comando y Protección de Motores* - Curso de Instalaciones Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[20] Anónimo (2012) - *Componentes Simétricas* - Curso de Redes Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[21] Anónimo (2012) - *Flujo de Cargas* - Curso de Redes Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[22] Anónimo (2012) - *Impedancias Secuenciales* - Curso de Redes Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería - UdelaR

[23] Anónimo (2012) - *Impedancias Síncronas de los elementos de la red* - Curso de Redes Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[24] Anónimo (2012) - *Protecciones contra Sobrecorrientes* - Curso de Instalaciones Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[25] Arq. Juan Francisco Vespa (2011). IM – Plan de Movilidad. *El desafío del transporte capitalino*(pp. 42, 44).

[26] Bandejas Portacables (2012) - Recuperado en Setiembre 2012 de http://www.bandejas-portacables.com/seccion_cliclip/componentes-tramo-recto.htm

[27] Cataldo, Nunes, Vignolo, Bertoni, Taks (2012). Convenio IM- UDELAR/FI. *Plan Estratégico de Energía para Montevideo (PEDEM)* (pp. 27-28, 30)

[28] Cotrim (2009) - *Instalações Eléctricas 5ta Ed*

[29] Dial (2011) - Recuperado en Abril 2011 de <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux/download.html>

[30] Diario JAEN (2010). *Un futuro muy presente* (p. 10)

[31] EL OBSERVADOR (2012). *Ómnibus eléctricos piden paso por los canteros de avenida Italia*. Recuperado el 07 de octubre de 2012, de www.elobservador.com.uy/noticia/234202/omnibus-electricos-piden-paso-por-los-canteros-de-avenida-italia/

[32] FCEIA - Recuperado en Octubre 2012 de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>

[33] Federico Miyara. FCEIA *NIVELES SONOROS* Recuperado en Octubre de 2012 de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>

[34] Fernando Bacigalupo, Juan Pablo Berta, Rodolfo Moreira, Fernando Scolieri, Daniel Trillo (1999) - *Estudio de factibilidad financiera proyecto "Tren de la Costa"*

[35] Fernando Sunyer (2011) - *Por qué de un tranvía*

[36] Fernando Sunyer (2011). ALSTOM *Por qué de un tranvía* (p. 68)

[37] Fillipi (2012) - Recuperado en Julio 2012 de http://www.3f-filippi.it/index.html?v_lingua=SPA

- [38] FLICKR (2008). Recuperado en 2012 de www.flickr.com/photos/tgva325/2866901371/
- [39] G. Casavilla, C. Briozzo (2011) - *Conmutados por la Red* - Curso de Electrónica de Potencia 2011 – Facultad de Ingeniería – UdelaR
- [40] Google - Recuperado en Octubre 2012 de <http://algotecnologia.blogia.com/temas/electricidad.php>
- [41] Günther G Seip (1989) - *Instalaciones Eléctricas Tomo 2*
- [42] IM (2011) - *Plan de Movilidad*
- [43] IM (2012) - Movilidad/Transito y transporte - *Observatorio de transito* (2012) Recuperado en 2012 de http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/articulo/evolucion_accidentes.pdf
- [44] IM (2012). *Evolución de los vehículos empadronados en el departamento de Montevideo (2001-2011)* Recuperado en 2012 de http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/articulo/evolucion_de_vehiculos_empadronados_0.pdf
- [45] IM (2012). Movilidad/Transito y transporte. *Costos*. Recuperado en 2012 de <http://www.montevideo.gub.uy> (p. 1)
- [46] IM-UdelaR/FI (2010) - *PEDEM: Etapa C1 Estado de Situación*
- [47] IM-UdelaR/FI (2012) - *PEDEM: Informe Final*
- [48] J.R. Martín - *Diseño de Subestaciones Eléctricas*
- [49] Jean-Pierre Fayemendy. *Metros, Tranvías y Trenes de Cercanía: Transporte urbano y Medio Ambiente* Recuperado en Octubre de 2012, de

http://www.munitel.cl/eventos/seminarios/html/DOCUMENTOS/2010/SEMINARIO_FRANCO_CHILENO/PPT16.pdf(pp. 18, 19, 22)

[50] José Raúl Martín (1992). *Diseño de subestaciones eléctricas*. (pp. 323-324)

[51] Kiessling, Puschmann, Schmieder, Schneider (2009). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*

[52] La Farga Group (2012). *Hilo de contacto ranurado*. Recuperado en 2012 de www.lfg.es

[53] Lucas MIRGALET (2011). SYSTRA & FASEP. *Un tranvía en Montevideo* (pp. 20, 32)

[54] Marcelo Benoit (2005). *LOS TRANVIAS DE MONTEVIDEO*. Recuperado en julio de 2012, de <http://lfu1.tripod.com/index-12.html>

[55] Mario Vignolo (2012) - *Iluminación* - Curso de Instalaciones Eléctricas 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR

[56] Mario Vignolo (2011) - *Sistemas de Puesta a Tierra en Media y Alta Tensión* - Curso de Subestaciones de Media Tensión 2011 – Facultad de Ingeniería - UdelaR

[57] Munitel (2012) - Recuperado en Octubre 2012 de http://www.munitel.cl/eventos/seminarios/html/DOCUMENTOS/2010/SEMINARIO_FRANCO_CHILENO/PPT16.pdf (pág. 18, 19, 22)

[58] MVOTMA (2004) - *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*(pp. 12, 20-23)

[59] MVOTMA (2006). *Inventario GEI* (pp. 1-2)

[60] MY_WEB (2011). *Melbourne`s Z, A and B Trams* Recuperado en 2011 de http://www.myweb.net.au/mottram/trams/zab/Melbourne_36.jpg

- [61] MY_WEB (2011). *Melbourne`s Z, A and B Trams* Recuperado en 2011 de http://www.myweb.net.au/mottram/trams/zab/Melbourne_215.jpg
- [62] MY_WEB (2011). *Melbourne`s Z, A and B Trams* Recuperado en 2011 de http://www.myweb.net.au/mottram/trams/zab/Melbourne_257.jpg
- [63] Norma CEI 255-3 / BS-142 (2012)
- [64] Norma EN 50 163 (2012)
- [65] Norma EN 50122-1 (2012)
- [66] Norma EN 60 034-1 (2012)
- [67] Norma IEEE 80 (2010)
- [68] Norma NO-DIS-DI-0002/00 (2012)
- [69] ORMAZABAL (2012) - *Aparamenta de Media Tensión: Distribución Primaria*
- [70] PIRELLI (2012) - *Cables y Accesorios de Baja Tensión*
- [71] PIRELLI (2012) - *Cables y Accesorios de Media Tensión*
- [72] R. Ramponi (2011) - *Módulo de Protecciones* - Curso de Subestaciones de Media Tensión 2012 – Facultad de Ingeniería – UdelaR
- [73] Raúl Zeballos (2011) - *Transformadores de Medida* - Curso de Subestaciones de Media Tensión 2011 – Facultad de Ingeniería - UdelaR
- [74] Revista de Ingeniería (1951). Recuperado en 2012, de <http://ar.groups.yahoo.com/>
- [75] S. Björklund (2000) - *New concepts for trolley buses in Sweden*

- [76] Schneider (2012) - Recuperado en Julio 2012 de http://www.schneiderelectric.es/html/ade/productos/luminarias_emergencia.html
- [77] SIEMENS (2011) - *PSS[®]E 32.1 Beta Users Guide*”
- [78] SIEMENS (2012) - *Sitras DSG*
- [79] SIEMENS (2012) - *Sitras REC*
- [80] SIEMENS (2012) - *Sitras TCI*
- [81] Soler y Palau (2012) - *Extractores Helicoidales Murales*
- [82] Tadeo Czerweny S.A. (2008) - *Transformadores de Distribución*
- [83] Tesar (2010) - *Transformadori di potenza in resina*
- [84] Tomás Andrés Elejalde Escobar (2005). *Consideraciones técnicas para la selección de un modo de transporte* (pp. 8-10, 12) Recuperado de http://www.alamys.org/Documentos/asamb_xix_medellin/metro.pdf
- [85] Tomás Di Lavello (2011) - *Diseño de Subestaciones* - Curso de Subestaciones de Media Tensión 2011 – Facultad de Ingeniería – UdelaR
- [86] TRANVIAS DE MONTEVIDEO. Recuperado en Octubre de 2012, de <http://ar.groups.yahoo.com/group/tranviasdemontevideo/files>
- [87] Tripod - Recuperado en Octubre 2011 de <http://theageofthetrain.tripod.com/historiatb1.html>
- [88] Tripod - Recuperado en Octubre 2011 de <http://theageofthetrain.tripod.com/historiatb2.html>

[89] TROLEBUSES DE MONTEVIDEO. Recuperado en Octubre de 2011, de <http://theageofthetrain.tripod.com/trolebusesdemontevideo.html>

[90] UITP (2002). *Billete al futuro las 3 paradas de la movilidad sostenible* (p. 17)

[91] UTE (2012) - *Criterios para la Elaboración de Proyectos*

[92] UTE (2012) - *Reglamento de Baja Tensión*

[93] UTE (2012) - *Subestaciones Modulares Normalizadas*

[94] UTE (2012). *Característica de la Demanda del día 25 de julio de 2012.*

[95] UTE (2012). *Parque Generador Disponible.*

[96] UTE (2012). *Pliego Tarifario.*

[97] UTE Central Punta del Tigre (2008) - *Pliego de condiciones particulares y Memoria Descriptiva particular Subestación 30/0.4 kV*

[98] UTE, Estudios Técnicos – Explotación Montevideo, Recuperado en Octubre de 2011

[99] UTE, Gerencia de Planificación y Estudios, División Redes de Distribución (2002) - *Modulo Básico de Evaluación de Proyectos*

[100] Viatger - Recuperado en Marzo 2010 de <http://electricidad-viatger.blogspot.com/2010/03/red-de-ferrocarril.html>

[101] Vignolo, M. y Berrutti, F. (2010). *Puesta a Tierra de Subestaciones*. Curso de Subestaciones en Media Tensión, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay.

[102] Wikipedia - Recuperado en Octubre 2012
de http://es.wikipedia.org/wiki/Tonelada_equivalente_de_petróleo

[103] Wikipedia (2012). *Efecto invernadero*. Recuperado el 25 de octubre de 2012, de
http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero

[104] Wikipedia (2012). *Tranvía*. Recuperado el 31 de octubre de 2012, de
<http://es.wikipedia.org/wiki/Tranvia>

[105] Yahoo - Recuperado en Octubre 2011
de <http://ar.groups.yahoo.com/group/tranviasdemontevideo/files/>

[106] Yahoo - Recuperado en Octubre 2011
de <http://ar.groups.yahoo.com/group/trenesdeluruguay/files/>